

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE FORMIGA – UNIFOR-MG
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA
DANÚBIA CRISTINA DE OLIVEIRA

**CONTRIBUIÇÕES E IMPACTOS AMBIENTAIS CAUSADOS PELA UTILIZAÇÃO
DE RESÍDUOS PLÁSTICOS PARA GERAÇÃO DE COMBUSTÍVEL**

FORMIGA – MG

2019

DANÚBIA CRISTINA DE OLIVEIRA

CONTRIBUIÇÕES E IMPACTOS AMBIENTAIS CAUSADOS PELA UTILIZAÇÃO DE
RESÍDUOS PLÁSTICOS PARA PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEL

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Química do UNIFOR-MG, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Me. Emerson Paulino dos Reis

FORMIGA – MG

2019

Danúbia Cristina de Oliveira

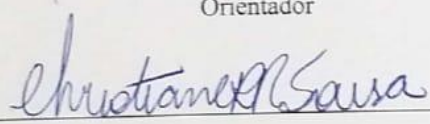
CONTRIBUIÇÕES E IMPACTOS AMBIENTAIS CAUSADOS PELA UTILIZAÇÃO DE
RESÍDUOS PLÁSTICOS PARA PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEL

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Engenharia Química do UNIFOR-
MG, como requisito parcial para obtenção do
título de bacharel em Engenharia Química.

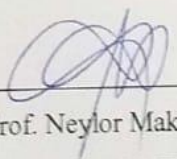
BANCA EXAMINADORA


Prof. Me. Emerson Paulino dos Reis

Orientador


Prof.ª M.ª Christiane Pereira Rocha Souza

UNIFOR-MG


Prof. Neylor Makalister Ribeiro Vieira

UNIFOR-MG

Formiga, 01 de novembro de 2019.

Dedico este trabalho aos meus pais, que não mediram esforços para que eu chegasse até esta fase de minha vida, e ao meu orientador Me. Emerson Paulino dos Reis, por toda paciência e conselhos para realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, por ter me permitido chegar até aqui com saúde e força para superar as dificuldades.

Ao Unifor-MG e ao corpo docente do curso de Engenharia Química, pela partilha de conhecimentos, e contribuição para a formação de nosso caráter e profissionalismo.

Aos meus amados pais, que me incentivaram e em meio de tantas dificuldades não mediram esforços para concretização desta etapa da minha vida.

Ao meu namorado, pela paciência e companheirismo durante esta jornada.

A minha família, e em especial minha avó Conceição, pelos incentivos.

Ao Prof. Dr. Rodrigo Duarte Silva, por seus ensinamentos, por seu auxílio nos momentos de dúvidas. Você contribuiu grandemente para a realização deste trabalho.

Em especial ao meu orientador Prof. Me. Emerson Paulino dos Reis, por acreditar em mim e aceitar me orientar na elaboração deste Trabalho de Conclusão de Curso. Serei eternamente grata aos ensinamentos transmitidos a mim, pela orientação, correções e incentivos.

Por fim gostaria de agradecer a todos, que de forma direta ou indireta contribuíram para a minha formação.

RESUMO

Anualmente, são gerados milhões de toneladas de resíduos plásticos, provenientes do aumento na demanda de consumo no mundo. Muitas das vezes estes resíduos plásticos são descartados de maneira incorreta, no meio ambiente, em aterros sanitários e lixões, poluindo e gerando inúmeros impactos ambientais. Neste contexto, este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre a viabilidade ambiental do processo de pirólise, técnica que transforma resíduos plásticos em combustível e em matéria-prima para diversos segmentos industriais. O processo de pirólise é uma alternativa viável para aumentar a vida útil de aterros sanitários, visto que reduz consideravelmente o volume de resíduos plásticos gerados e contribui para minimizar a utilização dos recursos fósseis não renováveis, tal como o petróleo. Além disso o processo é considerado energeticamente autossustentável, pois produz mais energia do que consome. Com relação as emissões geradas no processo, estas estão de acordo com os limites estabelecidos pela Resolução nº 316 de 29/10/2002, Art. n º 38 do CONAMA, que estabelece um limite para emissão de dioxinas e furanos de 0,50 ng/Nm³.

Palavras-chave: Polímeros. Pirólise. Meio Ambiente.

ABSTRACT

Every year, millions of tons of plastic waste are generated, resulting from the increase in consumer demand worldwide. Many times this plastic waste is disposed of incorrectly, in the environment, in sanitary landfills and dumps, polluting and generating countless environmental impacts. In this context, this work presents a literature review on the environmental feasibility of the pyrolysis process, a technique that transforms plastic waste into fuel and raw material for several industrial segments. The pyrolysis process is a viable alternative to increase the useful life of sanitary landfills, since it considerably reduces the volume of plastic waste generated and contributes to minimize the use of non-renewable fossil resources, such as oil. Furthermore, the process is considered self-sustaining because it produces more energy than it consumes. Regarding the emissions generated in the process, these are in accordance with the limits established by Resolution n° 316 of 29/10/2002, Art. n° 38 of CONAMA, which establishes a limit for the emission of dioxins and furans of 0.50 ng/Nm³.

Keywords: Polymers. Pyrolysis. Environment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cadeia produtiva do plástico.....	24
Figura 2 – Etapas do processo de reciclagem secundária.....	38
Figura 3 – Torre de destilação do petróleo	43
Figura 4 - Processo de produção de etanol a partir de cana-de-açúcar.....	45
Figura 5 – Processo pirolítico de resíduos plásticos.....	49
Figura 6 – Degradação aleatória do polietileno.....	50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Polímeros constituintes do grupo dos termoplásticos e termofixos	25
Quadro 2 - Código de identificação dos principais tipos de plásticos.....	26
Quadro 3 - Especificações das principais frações do petróleo	42
Quadro 4 - Principais reatores utilizados no processo de pirólise.....	47
Quadro 5 - Parâmetros que influenciam a distribuição de produtos da pirólise.....	60
Quadro 6 - Principais produtos obtidos pela degradação térmica de polímeros	62
Quadro 7 - Capacidade calorífica de alguns plásticos e combustíveis	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produção mundial de plásticos em milhões de toneladas	28
Tabela 2 – Principais municípios geradores de empregos em 2017	31

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Produção de plástico no mundo em 2017.	28
Gráfico 2 – Principais setores consumidores de plásticos na Europa (2017).....	29
Gráfico 3 – Demanda europeia por tipo de resina em 2017	30
Gráfico 4 – Principais tipos de plásticos consumidos no Brasil em 2016.....	31
Gráfico 5 – Setores consumidores de plásticos em 2016	32
Gráfico 6 – Produção de transformados plásticos no Brasil (Em milhões de toneladas).....	33
Gráfico 7 – Consumo aparente de transformados plásticos (Em milhões de toneladas).....	34
Gráfico 8 – Processos produtivos de transformados plásticos no Brasil em 2015	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABIPLAST	Associação Brasileira da Indústria do Plástico
ADZ3	Catalisador Zeolítico
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ABS	Terpolímero Acrilonitrilo/Estireno/Butadieno
C ₂ H ₅ O	Etanol
CG-MS	Cromatografia Gasosa Acoplada a Espectrometria de Massas
CH ₄	Metano
CIS	Commonwealth of Independent States
CNQ	Confederação Nacional do Ramo Químico
CO ₂	Dióxido de Carbono
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DMA	Óleo Diesel Marítimo A
DMB	Óleo Diesel Marítimo B
EPA	United States Environmental Protection Agency
EPS	Poliestireno Expandido
FCC	Fluid Catalytic Cracking
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GNV	Gás Natural Veicular
HCl	Ácido Clorídrico
HPIS	Poliestireno de alto impacto
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PET	Polietileno Tereftálico
PMMA	Polimetacrilato de Metilo
PNRS	Política Nacional dos Resíduos Sólidos
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PU	Poliuretano
PVC	Policloreto de Vinila
RCRA	Resource Conservation and Recovery Act

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	PROBLEMA	17
3	OBJETIVOS	18
3.1	Objetivo geral.....	18
3.2	Objetivos específicos.....	18
4	JUSTIFICATIVA	19
5	METODOLOGIA.....	20
6	REFERENCIAL TEÓRICO	21
6.1	Conceitos básicos sobre plásticos e polímeros.....	21
6.1.1	História dos plásticos.....	22
6.1.2	Cadeia produtiva dos plásticos.....	23
6.1.3	Tipos de materiais poliméricos.....	24
6.1.4	Produção e consumo de materiais plásticos no mundo	27
6.1.5	Produção e consumo de plástico no Brasil	30
6.1.6	Impactos ambientais causados pelo plástico	35
6.1.7	Reciclagem de resíduos plásticos.....	36
6.1.8	Tipos de reciclagem de plásticos.....	37
6.2	Legislações ambientais e reciclagem	39
6.2.1	Legislações internacionais para o processo de reciclagem	40
6.3	Combustíveis	41
6.3.1	Petróleo	41
6.3.2	Transformação do petróleo em gasolina	43
6.3.3	Óleo Diesel.....	44
6.3.4	Etanol.....	45
6.4	Pirólise	46
6.5	Pirólise de resíduos plásticos	48
6.5.1	Pirólise de polietileno	49
6.5.2	Pirólise de Polipropileno	52
6.5.3	Poli (tereftalato de etileno).....	53
6.5.4	Poliestireno	54
6.5.5	Policloreto de Vinila	55
6.6	Pirólise Catalítica.....	56

6.6.1	Polietileno	57
6.6.2	Polipropileno	58
6.6.3	Poliestireno	59
6.7	Fatores que influenciam a pirólise de resíduos plásticos	59
6.8	Caracterização dos produtos da pirólise	61
6.9	Combustível de pirólise	62
6.10	Contribuições do processo	63
6.11	Impactos do processo	66
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

1 INTRODUÇÃO

Os polímeros são macromoléculas, unidas por ligações covalentes que se repetem ao longo das cadeias. Os polímeros são popularmente chamados de plásticos, dividindo-se em sintéticos ou naturais e caracterizando-se em termoplásticos ou termofixos (SPINACÉ; DE PAOLI, 2005). Os plásticos são amplamente utilizados em diversos segmentos industriais, pois possuem excelentes propriedades como flexibilidade, leveza, maleabilidade e fácil manipulação (GOMES, 2013). Tais propriedades aumentam a demanda para o consumo destes materiais, substituindo produtos como vidro, metais, dentre outros. Consequentemente, com o aumento da demanda de consumo dos plásticos, são geradas milhares de toneladas de resíduos, os quais são descartados incorretamente, em aterros sanitários, lixões, aumentando a disposição sem nenhum tipo de reciclagem (ASSUMPCÃO et al., 2018).

Os resíduos plásticos quando dispostos incorretamente, causam danos ao meio ambiente. Portanto se faz necessário a utilização de técnicas de reciclagem. Existem quatro formas de reciclagem de polímeros, tais como: reciclagem primária, reciclagem secundária (reciclagem mecânica), reciclagem terciária (reciclagem química), reciclagem quaternária (reciclagem energética) (FIGUEIREDO, 2015).

Este trabalho aborda uma das principais técnicas de recuperação de resíduos plásticos pós-consumo, bem como as contribuições e impactos ambientais causados por este processo, denominado de pirólise. A pirólise é uma técnica, que minimiza os impactos ambientais gerados pelo descarte incorreto de resíduos plásticos. De acordo com Moraes et al. (2015), o processo de pirólise pode ser definido como uma reação de decomposição térmica na ausência de oxigênio, conduzido a altas temperaturas. O processo de pirólise é definido em função das condições em que a reação ocorre, seja em função da temperatura, tipo de reator, taxa de aquecimento, tempo de residência, dentre outros parâmetros. A reação pode ser do tipo: pirólise lenta, pirólise rápida e pirólise instantânea ou flash (PARADELA, 2012). A reação também pode ocorrer na presença de catalisadores (pirólise catalítica), o que permite uma conversão maior e uma alta seletividade de produtos (SANTOS, 2018). Os produtos provenientes da pirólise de resíduos plásticos podem ser gases, líquidos ou ceras (GONÇALVES, 2007).

A pirólise apresenta-se como um processo vantajoso, visto que permite a reciclagem de uma ampla gama de plásticos ou compósitos, admitindo um grau de contaminantes elevado, os quais não poderiam ser reciclados convencionalmente (SANTOS, 2018). O processo de pirólise possui vantagens como a preservação da vida útil de aterros sanitários, e permite a preservação de recursos fósseis como o petróleo, pois produz um óleo pirolítico com propriedades

combustíveis semelhantes às da gasolina. Além disso, o processo é considerado energeticamente autossustentável, pois produz mais energia do que consome. Entretanto, a pirólise de plásticos com adição de catalisadores, emite gases que podem agravar o efeito estufa. Dentre as emissões atmosféricas geradas no processo, as dioxinas e furanos encontram-se dentro dos limites estabelecidos pela resolução do CONAMA.

2 PROBLEMA

Atualmente um dos maiores problemas enfrentados pela sociedade é o gerenciamento e o descarte de resíduos sólidos, dentre estes, o plástico (GONÇALVES, 2007). Mesmo com todos os benefícios que os plásticos trazem para a sociedade, os resíduos gerados por eles são prejudiciais. Os plásticos causam inúmeros impactos ambientais quando dispostos de forma incorreta, causando danos à saúde humana, aos animais e ao meio ambiente (OLIVEIRA, 2012). Entretanto, a problemática envolvida na disposição final de resíduos plásticos, pode tornar-se solução quando relacionada à geração de eletricidade (FANECA, 2018).

De forma análoga aos problemas de destinação final dos resíduos plásticos, encontra-se a necessidade de encontrar novas fontes de energia, visto que as reservas de petróleo podem vir a esgotarem algum dia. A pirólise de resíduos plásticos é uma técnica de decomposição térmica (na presença ou não de catalisadores), na ausência de oxigênio, que permite tratar os resíduos plásticos, gerando um óleo com propriedades petroquímicas, dentre outros produtos tais como, gases, sólidos e matérias-primas para diversas indústrias químicas. Diante dos cenários, o presente estudo emerge do seguinte questionamento: Quais as contribuições e impactos ambientais causados pelo processo de pirólise de resíduos plásticos?

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Avaliar as contribuições e os impactos ambientais provenientes da produção de combustível através da pirólise de resíduos plásticos.

3.2 Objetivos específicos

- Descrever o processo de pirólise para obtenção de combustível a partir de resíduo plástico;
- Identificar os resíduos gerados nesse processo;
- Identificar os pontos positivos e negativos em termos ambientais do processo de pirólise de resíduos plásticos.

4 JUSTIFICATIVA

Atualmente as crises dos plásticos e dos combustíveis caminham em rumos preocupantes ao meio ambiente. Anualmente, milhões de toneladas de plásticos são produzidas, gerando milhares de toneladas de resíduos pós-consumo, muitas vezes descartados de forma incorreta em lixões, aterros sanitários, rios, solos e mares, deixando de serem reciclados de forma correta, o que prejudica a vida útil dos aterros e provoca a poluição do meio ambiente. A geração excessiva de resíduos plásticos gera um enorme volume de lixo, ocupando um grande espaço no meio ambiente, o que dificulta a decomposição de outros materiais orgânicos e acarreta em vários outros impactos ambientais. O plástico é produzido através do petróleo, e para obtê-lo é necessário que ocorra todo o processo de refino. Assim, por mais que a parcela de óleo negro existente no plástico seja pequena, o processo para extraí-lo e refiná-lo poluem excessivamente o meio ambiente (CERRI, 2011). A cada dia o petróleo se torna mais escasso, aumentando a necessidade de se buscar novas fontes de energia. De acordo com Rosa e Gauto (2011), depois de um longo período de exploração, as reservas de petróleo fatalmente se esgotam. Entretanto, antes que o petróleo se esgote, possivelmente serão encontrados substitutos para suprir as necessidades mundiais de energia

Uma das soluções para este tipo de problema encontra-se no processo de transformação de resíduos plásticos em combustível através da pirólise, que transforma os resíduos plásticos em um óleo com propriedades petroquímicas. Todavia, deve-se atentar quanto ao tipo de plástico utilizado neste processo, pois, alguns plásticos podem gerar gases altamente poluentes após a combustão. Nesse contexto, este trabalho visa avaliar a viabilidade ambiental do processo de produção de combustível através da pirólise de resíduos plásticos, enfatizando as contribuições e impactos ambientais gerados pelo mesmo.

5 METODOLOGIA

O presente trabalho caracteriza-se como uma revisão bibliográfica, de caráter qualitativo. Para a realização deste estudo, utilizou-se o método de revisão literária de estudos que abordavam o processo de pirólise de resíduos plásticos, fundamentando-se em artigos científicos, livros, dissertações, monografias, teses, e em outras fontes disponíveis na internet, bem como Scielo, Google Books, Google Acadêmico, portal da Abiplast, e pela Minha Biblioteca disponibilizada no site do Unifor. Devido à escassez de trabalhos relacionados às contribuições e impactos ambientais do processo de pirólise de resíduos plásticos, não foi possível estabelecer um filtro recente (de até 10 anos) para o período de publicação, estendendo-se pelo período de 1985 a 2019, de forma a atender os objetivos do trabalho.

Por fim, devido a tal escassez de fontes de pesquisas relacionadas a pirólise de resíduos plásticos, escolheu-se como objeto de avaliação dos impactos e contribuições ambientais, o processo de pirólise em geral. Para os resultados, buscou-se analisar nos trabalhos pesquisados as vantagens e desvantagens da pirólise de resíduos plásticos, avaliando as condições do processo, os fatores que influenciam os produtos e os gases emitidos, comparando-os com os valores permitidos pela legislação vigente do CONAMA 316/02.

6 REFERENCIAL TEÓRICO

Serão abordados neste referencial teórico conceitos sobre o plástico, os impactos ambientais causados pelo plástico, os tipos de reciclagem de plásticos e legislações pertinentes ao processo de reciclagem em âmbitos nacional e internacional. Também serão discutidos os tipos de combustíveis mais comumente utilizados no mercado brasileiro, para a movimentação de motores: a gasolina, o etanol e o óleo diesel. Por último, serão discutidos o processo de pirólise de resíduos plásticos pós-consumo e a geração de resíduos desse processo. Dessa forma, espera-se avaliar a viabilidade ambiental do processo de transformação de resíduos poliméricos em combustível através do processo de pirólise, ao se examinar as contribuições e impactos ambientais gerados durante o processo.

6.1 Conceitos básicos sobre plásticos e polímeros

A palavra plástico deriva do grego *plastikós*, que significa próprio para ser moldado ou modelado. No Dicionário de Polímeros, Andrade et al. (2001), descreve plástico como um termo geral dado a materiais macromoleculares que podem ser moldados por ação de calor ou pressão. De acordo com Piatti e Rodrigues (2005), as macromoléculas são formadas por moléculas menores, denominadas monômeros, que reagem para formação dos polímeros em um processo de polimerização. Para que a reação de polimerização ocorra, é necessário que pequenas moléculas com pontos reativos liguem-se entre si, formando uma cadeia polimérica (CANEVAROLO JR, 2013).

O termo polímero foi criado por Berzeulius em 1832, na tentativa de diferenciar as moléculas orgânicas que possuíam os mesmos elementos químicos, sem possuírem as mesmas propriedades químicas. No entanto o termo só foi utilizado da forma em que é conhecido atualmente após 1922, quando Staudinger propôs a teoria da macromolécula (NUNES; LOPES, 2014).

As resinas plásticas primordiais no processo de transformação de plásticos a partir de diferentes processos de produção são: polietileno de baixa ou alta densidade (PEBD/PEAD), polipropileno (PP), policloreto de vinila (PVC), poliestireno (PS) e polietileno tereftalato (PET). Tais resinas podem ser utilizadas para a produção de produtos destinados ao consumo, em processos industriais e em diversos setores de atividades como, por exemplo, embalagens para alimentos, peças para automóveis, celulares, eletroeletrônicos, dentre outros (ABDI, 2008).

6.1.1 História dos plásticos

O caminho para descoberta do plástico foi bem longo, e de lá para cá, a sua utilização vem se intensificando cada vez mais. Tudo começou em meados de 1000 a. C., quando de acordo com Gorni (2003), os chineses descobriram um verniz extraído da árvore *Rhus verniciflua*, o qual foi aplicado como revestimento impermeabilizante de móveis domésticos até a década de 1950.

Ainda de acordo com Gorni (2003), em 79 a.C., ocorreu a descoberta de uma resina termoplástica proveniente de árvores fossilizadas, encontrada no Mar Báltico, chamada de âmbar. Este tipo de resina permitia a fabricação de pequenas peças através de moldagem por compressão.

Muita coisa aconteceu até que em 1839, Charles Goodyear descobriu o processo de vulcanização, criando a borracha vulcanizada. Neste mesmo ano, foi descoberto o poliestireno. Entretanto não havia condições para a sua fabricação naquela época (GORNI, 2003). Mas o processo para a descoberta do plástico não parava por aí.

Pouco antes da metade do século dezenove, em 1840, na Inglaterra, Alexandre Parkes iniciava os seus estudos com nitrato de celulose, um tipo de resina moldável e extremamente inflamável, que ganhou o nome de Parkesina. Ainda no século dezenove ocorreram outras descobertas de polímeros sintéticos como o PVC (cloreto de polivinila) e a viscosa (OLIVEIRA, 2012).

De acordo com Andrady e Neal (2009), nos primeiros cinquenta anos do século vinte, houve uma expansão significativa do desenvolvimento dos plásticos modernos, com a invenção de cerca de quinze novos tipos de polímeros sintéticos. Segundo Gorni (2003), no ano de 1949, surgiu no Brasil a primeira fábrica de poliestireno, conhecida como Bakol S.A, instalada na cidade de São Paulo.

Atualmente o desenvolvimento de novos polímeros encontra-se relacionado a blendas poliméricas que combinam várias propriedades e compostos com aditivos, o que garante melhores propriedades térmicas, mecânicas e químicas em relação ao polímero base (PITT; BOING; BARROS, 2011).

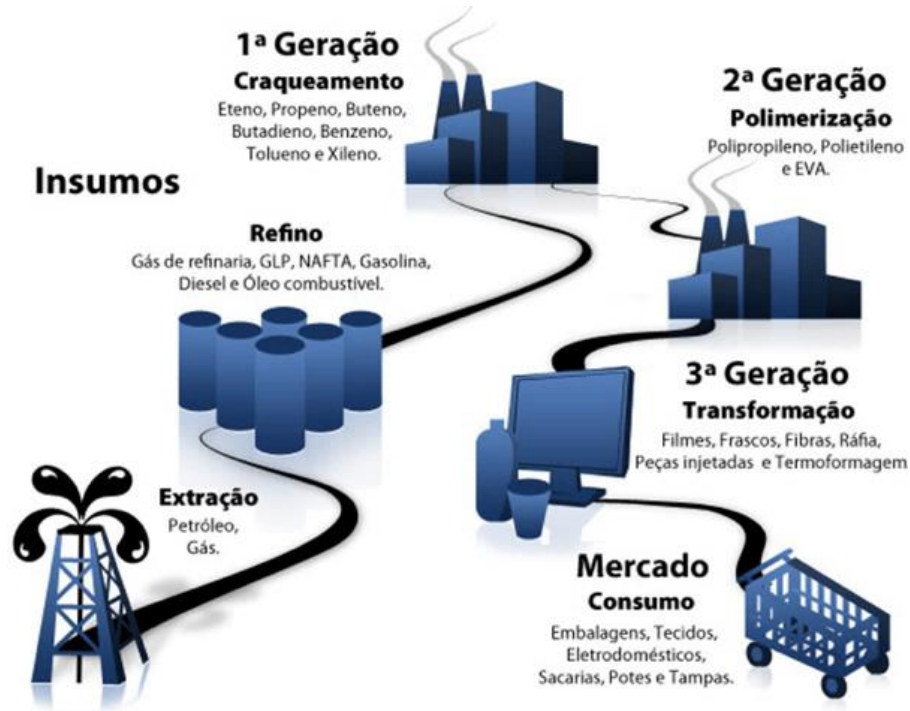
6.1.2 Cadeia produtiva dos plásticos

Uma das principais matérias-primas para produção dos plásticos é o petróleo (PIATTI; RODRIGUES, 2005). O petróleo é definido por Martins et al. (2015), como um combustível fóssil, rico em hidrocarbonetos, principalmente alcanos.

A cadeia produtiva do plástico inicia-se com a obtenção da nafta pelo processo de destilação do petróleo ou do gás natural (OLIVEIRA, 2012). A indústria petroquímica engloba grande diversidade de produtos, sendo todos eles derivados do petróleo e denominados geralmente como petroquímicos básicos (1ª geração) e petroquímicos finais (2ª geração), constituindo a parte da indústria química que utiliza como matéria-prima a nafta ou o gás natural. No Brasil a nafta (92%) é a principal matéria-prima da cadeia petroquímica, seguida pelo gás natural (8%), sendo que a Petrobrás é praticamente a única produtora de nafta e gás natural no País, atendendo parte da demanda nacional com produção própria e importações (VIANA, 2017).

A transformação da nafta em insumos petroquímicos caracteriza a primeira geração petroquímica. Estes insumos serão destinados à segunda geração petroquímica onde acontece a síntese dos polímeros, gerando as resinas termoplásticas que seguem para a terceira geração petroquímica, onde serão utilizadas como matérias-primas pelos transformadores de plástico e convertidas em produto final (FIG. 1). A nafta é a fração de maior interesse dentro do setor petroquímico e matéria-prima utilizada no processo de fabricação dos produtos petroquímicos básicos, como eteno, propeno, butadieno, benzeno, tolueno e xileno, dentre outros que serão utilizados na produção dos principais tipos de polímeros usados na indústria de transformação (ABIPLAST, 2014; 2017).

Figura 1 – Cadeia produtiva do plástico



Fonte: BARBOSA et al., 2016.

6.1.3 Tipos de materiais poliméricos

Mano e Mendes (1999) e Nunes e Lopes (2014), propõem em seus trabalhos que os polímeros classificam-se em dois grupos de acordo com a sua origem: naturais e sintéticos. Os polímeros naturais estão presentes na natureza como celulose, amido, lignina, borracha, dentre outros. Já os polímeros sintéticos, são aqueles sintetizados em laboratórios ou indústrias, através de processos de polimerizações (NUNES; LOPES, 2014).

Os materiais poliméricos também podem ser divididos em dois grandes grupos de acordo com o comportamento térmico durante o processamento: os termoplásticos e os termofixos. Os termoplásticos quando aquecidos, amolecem tornando-se moldáveis. Por sua vez, os polímeros termofixos não se moldam facilmente quando aquecidos (OLIVEIRA, 2012). No QUADRO 1 estão listados os principais tipos de polímeros sintéticos, dentro do grupo dos termoplásticos e termofixos.

Quadro 1 - Polímeros constituintes do grupo dos termoplásticos e termofixos

Termoplásticos	Termofixos
Politereftalato de etileno (PET ou PET)	Poliuretano (PU)
Polietileno de Alta Densidade (PEAD)	Resinas alquílicas
Polietileno de Baixa Densidade (PEBD)	Resinas Epoxídicas
Policloreto de Vinilo Flexível (UPVC)	Poliésteres
Policloreto de Vinilo Rígido (PPVC)	Resinas fenólicas
Polipropileno (PP)	
Poliestireno (PS)	
Poliestireno Expandido (EPS)	
Terpolímero Acrilonitrilo/Estireno/Butadieno (ABS)	
Copolímero Acrilonitrilo/ Estireno de Metilo (SAN)	
Polimetacrilato de Metilo (PMMA)	
Acrílicos	
Acetais	
Policarbonatos	



Fonte: Costa (2006).

Os diferentes tipos de plásticos apresentam códigos de identificação que aparecem nos produtos produzidos a partir desses, os quais facilitam seu processo de separação para posterior reutilização (COSTA, 2006). De acordo com Spinacé e De Paoli (2005), a identificação dos materiais poliméricos sintéticos é uma etapa importante que facilita a separação dos mesmos e pode ser utilizada em todos os ramos da indústria de reciclagem dos polímeros. No QUADRO 2 são apresentados os códigos de identificação bem como características e exemplos de aplicações dos principais plásticos sintéticos.

Quadro 2 - Código de identificação dos principais tipos de plásticos (Continua)

Código	Tipo de plástico	Características	Aplicações
	Politereftalato de etileno (PET ou PETE)	Transparente, impermeável a gases e à humidade e resistente ao calor.	Garrafas de água e de refrigerantes, embalagens de produtos alimentares, enchimentos de almofadas e sacos cama, fibras têxteis, etc.
	Polietileno de alta densidade (PEAD)	Rígido, resistente a produtos químicos e à humidade, permeável a gases, fácil de produzir e moldar.	Garrafas de leite, água e sumos, garrafas para produtos químicos domésticos, garrafas de álcool, embalagens de iogurte e de manteiga, brinquedos, tanques de combustível, etc.
	Vinílico (Policloreto de Vinilo flexível ou UPVC)	Versátil, rígido, resistente à gordura e a produtos químicos, transparente.	Embalagens transparentes de alimentos, garrafas para detergentes líquidos, embalagens para aplicações médicas, isolamentos de fios e cabos, etc.
	Vinílico (Policloreto de Vinilo rígido ou PPVC)	Flexível, elástico e transparente.	Tubos e conexões para água, calçado, acessórios médico-cirúrgicos, revestimentos, etc.
	Polietileno de baixa densidade (PEBD)	Fácil de transformar, impermeável à humidade, flexível, fácil de selar.	Embalagens de alimentos, garrafas para apertar (mostarda, ketchup), sacos industriais, sacos para o lixo, lonas agrícolas, filmes, etc.
	Polipropileno (PP)	Resistentes a produtos químicos e ao calor, permeável à humidade e a gordura e versátil.	Embalagens para massas e bolachas, recipiente de iogurte, manteiga, seringas descartáveis, acessórios médicos cirúrgicos, fibras, fios têxteis, peças de automóvel, etc.

(Conclusão)

Código	Tipo de plástico	Características	Aplicações
	Poliestireno (PS)	Transparente ou opaco semi-áspero, vidrado, rígido, frágil, funde a 95°C. Não é resistente a gorduras e a solventes.	Pratos, talheres chávénas e copos para água e café descartáveis, embalagens de alimentos, aparelhos de som e televisões, revestimento de frigoríficos, capas de CD's, etc.
	Poliestireno Expandido (EPS)	Alveolar, leve, absorve energia, isolante térmico.	Embalagens de carne, painéis isolantes, caixas, enchimentos de proteção de objetos frágeis, etc.
	Incluí todas as outras resinas e combinações de várias resinas. Exemplos: poliamidas (PA), copolímeros acrilonitrilo/estireno/butadieno e acrilonitrilo/estireno (ABS/SAN), polimetacrilato de metila (PMMA), acrílicos, poliuretanos (PU) e resinas fenólicas.		

Fonte: COSTA 2006 apud ISSO 11469¹.

Os códigos retratados no QUADRO 2, indicam qual o tipo de matéria-prima foi empregada no processo de produção de utensílios e equipamentos, beneficiando o processo de separação e reciclagem dos diversos tipos de polímeros (ROCHA; SILVA; SOUZA, 2013).

6.1.4 Produção e consumo de materiais plásticos no mundo

Os polímeros interagem intensamente na vida das pessoas, podendo ser encontrados em produtos simples e complexos, como embalagens alimentícias e revestimentos de tubos para exploração de petróleo. Tal diversidade se deve à capacidade de substituir ou aperfeiçoar os materiais dos quais o polímero fará parte (NUNES; LOPES, 2014).

Segundo a Abiplast (2017), os materiais plásticos foram desenvolvidos em meados de 1900, com o objetivo inicial de substituir o marfim dos elefantes, e assim o plástico foi consolidado como um material leve, versátil e resistente. Desde então, o uso do plástico cresceu de forma exponencial, impulsionado pela indústria de embalagens, estimando-se que em 2050 a produção deste material chegue a 33 bilhões de toneladas (BRASIL, 2018).

¹ ISSO 11469: “Plastics-Generic identification and marketing of Plastics Products

De acordo com Soares (2017), cientistas americanos constataram que de 1950, quando se iniciou a produção de plástico sintético em larga escala, até 2015 foram gerados cerca de 8,3 bilhões de toneladas de plástico no mundo. Neste mesmo período a produção mundial de plástico cresceu de 1,7 milhões em 1950, para 269 milhões de toneladas em 2015 (TAB. 1) (OLIVEIRA, 2012; PLASTICS EUROPE, 2011).

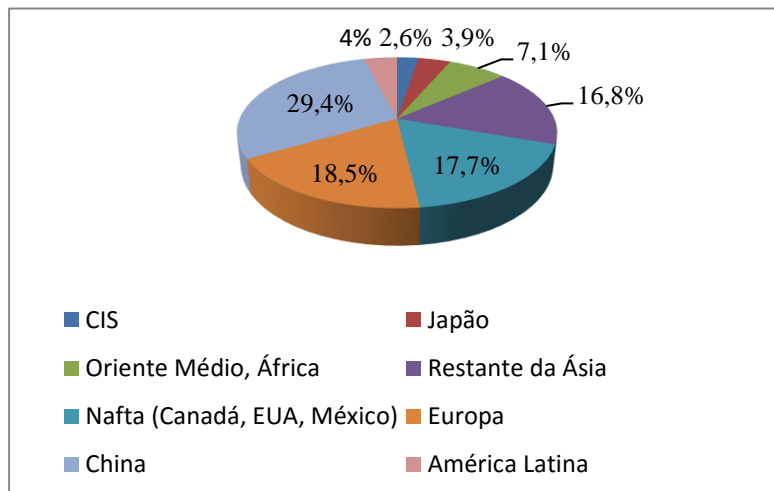
Tabela 1 – Produção mundial de plásticos em milhões de toneladas

Ano	Produção mundial de plásticos
1950	2
2015	269
2016	280
2017	348

Fonte: A autora adaptado de PLASTICS EUROPE (2016, 2017, 2018); SOARES, 2017.

De acordo com Plastics Europe (2018), em 2017 a China foi o maior produtor mundial de termoplásticos e poliuretanos, com um percentual de 29,4%, seguida pela Europa com 18,5% e Nafta (Estados Unidos, Canadá e México) com 17,7%. Os dados relacionados à produção mundial de plásticos em 2017 são apresentados no GRAF. 1 (a sigla CIS, *Commonwealth of Independent States*, compreende aos países: Armênia, Belarus, Cazaquistão, Federação Russa, Moldávia, Quirguistão, Tadjiquistão, Turcomenistão, Ucrânia, Uzbequistão, Geórgia e Azerbaijão) (ABIPLAST, 2016).

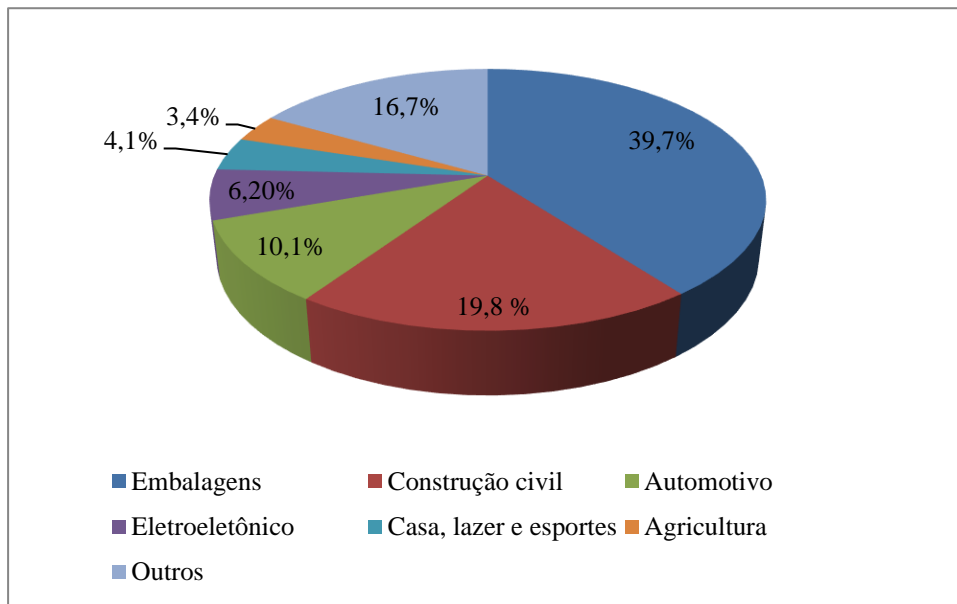
Gráfico 1 - Produção de plástico no mundo em 2017.



Fonte: PLASTICS EUROPE, 2018.

Com relação ao consumo europeu por diferentes tipos de segmentos, as embalagens plásticas se destacam, com um percentual de consumo de 39,7 % no ano de 2017, sendo seguida pela construção civil com 19,8 % e o setor automotivo com 10,1% (PLASTICS EUROPE, 2018). No GRAF. 2 estão representados os principais setores do mercado consumidor de plástico na Europa.

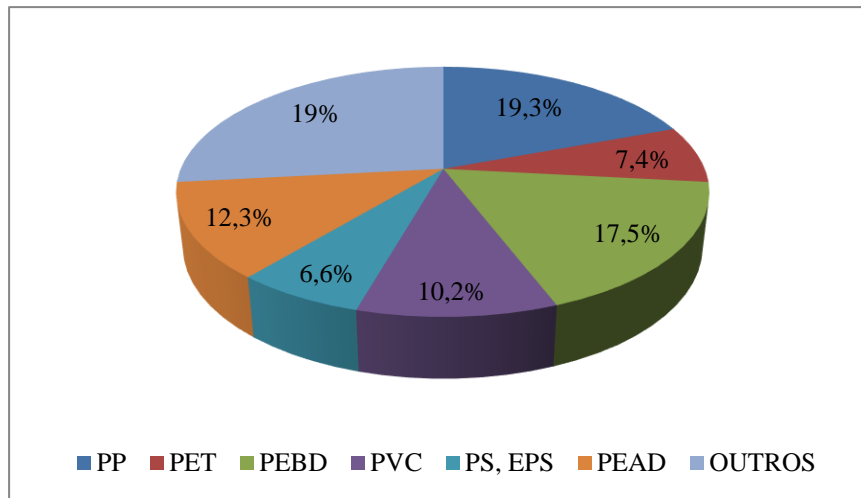
Gráfico 2 – Principais setores consumidores de plásticos na Europa (2017)



Fonte: PLASTICS EUROPE, 2018.

No GRAF. 2 o setor “outros” inclui equipamentos médicos, móveis e mobiliário de equipamentos de plástico, peças técnicas utilizadas para engenharias, etc. (PLASTICS EUROPE, 2018). De acordo com Hervé Millet (2018), o consumo de plástico está conectado ao desenvolvimento econômico dos países. A este fato é adicionado o consumo de embalagens, cuja demanda é alta em países em desenvolvimento e que representa quase 40% dos plásticos consumidos na Europa. Baseado nas demandas europeias de diversos tipos de plásticos, o GRAF. 3 apresenta os principais polímeros consumidos na Europa em 2017.

Gráfico 3 – Demanda europeia por tipo de resina em 2017



Fonte: PLASTICS EUROPE, 2018.

O consumo dos diferentes tipos de resinas poliméricas é um fator importante para analisar a demanda por plástico (OLIVEIRA, 2012). No GRAF. 3 é possível observar as resinas mais consumidas na Europa no ano de 2017, sendo elas: polipropileno (PP), polietileno de baixa densidade (PEBD), polietileno de alta densidade (PEAD), policloreto de vinila (PVC) e o setor outros que inclui materiais utilizados para fabricação de peças de automóveis, equipamentos eletroeletrônicos, dispositivos cirúrgicos, etc. (PLASTICS EUROPE, 2018).

6.1.5 Produção e consumo de plástico no Brasil

Apesar de quedas nos níveis de produção de transformados plásticos por três anos consecutivos, o ano de 2017 registrou uma recuperação de 2,5% no volume de produtos plásticos produzidos (ABIPLAST, 2017)

Dados de 2016 apresentaram um total de 11.312 empresas produtoras de transformados plásticos no Brasil, produzindo 6,1 milhões de toneladas de transformados, com um faturamento de R\$ 65,8 bilhões e um total de 310.421 empregos gerados. Cerca de 73,4% dessas empresas são microempresas, o que é reflexo de uma elevada taxa de empreendedorismo no setor e também reflexo de empresas de caráter familiar. Em 2017 o número de empresas de transformados plásticos no Brasil diminuiu para 11.127 sinalizando uma queda de 1,66% no número de empresas do ano anterior. Entretanto neste mesmo ano de 2017 foram produzidas 6,2 milhões de toneladas de plásticos, com um faturamento de R\$ 78,3 bilhões e 312.934 empregos gerados pelo setor. De acordo com a Abiplast (2019), a cada R\$ 1 milhão de adicionais de produção das indústrias de transformados plásticos, são gerados 29 novos

empregos. Na TAB. 2 são apresentados os principais municípios geradores de empregos no setor plástico em 2017 (ABIPLAST, 2017; NUNES; SANTOS, 2015).

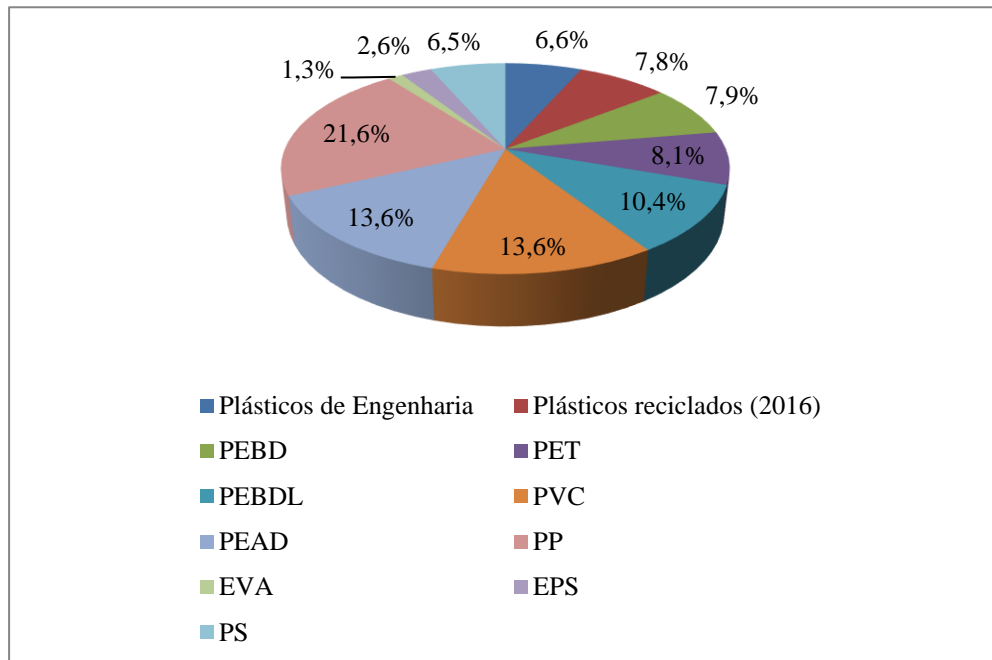
Tabela 2 – Principais municípios geradores de empregos em 2017

Município	Empregos gerados
São Paulo	24.558
Guarulhos	8.341
Joinvile	8.255
Manaus	7.735
Caxias do Sul	6.471

Fonte: ABIPLAST, 2017.

O consumo por tipos de plásticos no Brasil assemelha-se ao panorama europeu, sendo os plásticos mais consumidos no país o PP, PEAD, PVC, PEBDL e EPS (GRAF. 4) (FRAGA, 2014).

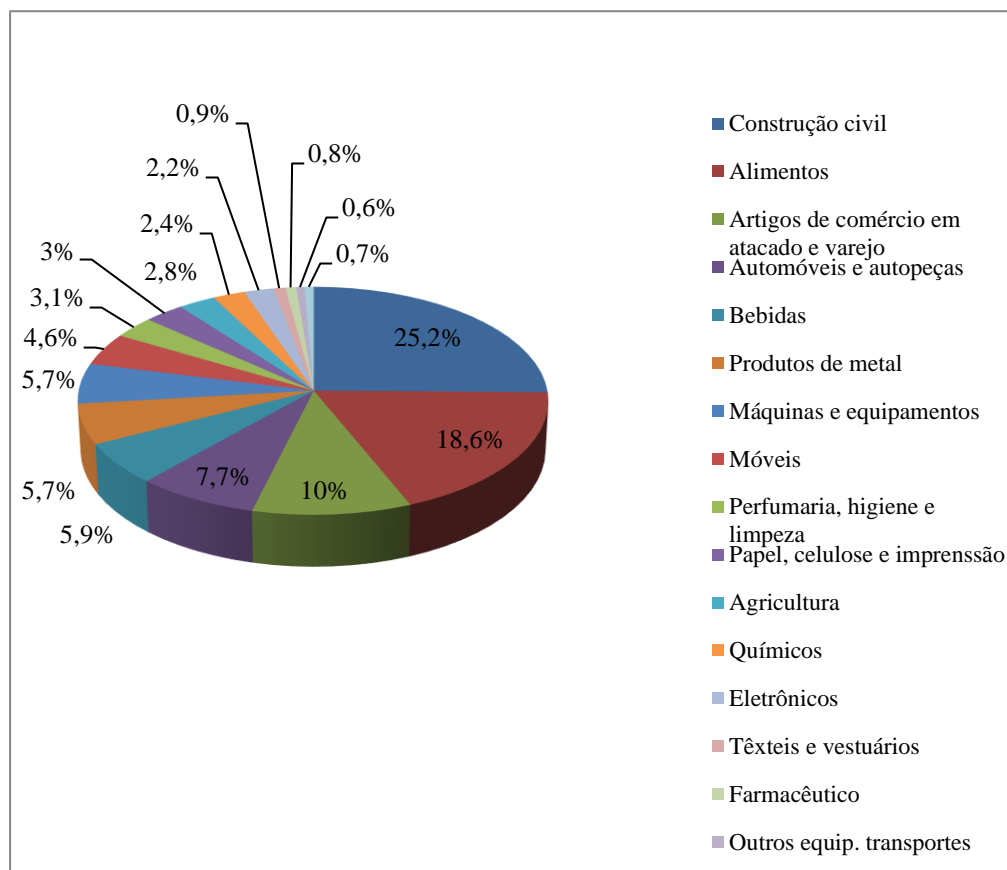
Gráfico 4 – Principais tipos de plásticos consumidos no Brasil em 2016



Fonte: ABIPLAST, 2017.

Devido às propriedades de resistência e leveza, os plásticos se mostram fortemente presentes no setor de construção civil, automóveis e autopeças, móveis e eletroeletrônicos. Tais aplicações possuem um ciclo de vida longo, (acima de 5 anos) e são responsáveis por 52% do mercado consumidor de plástico (ABIPLAST, 2017). O GRAF.5 apresenta a distribuição do consumo de plásticos no Brasil no ano de 2016.

Gráfico 5 – Setores consumidores de plásticos em 2016

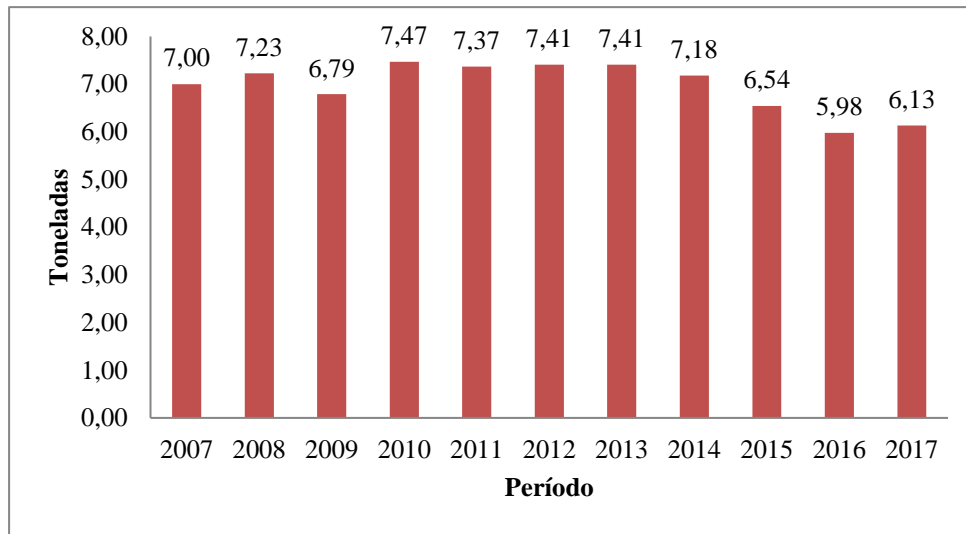


Fonte: ABIPLAST, 2017.

Analisando por segmento, o setor que possui o maior consumo de transformados plásticos no Brasil é o setor da construção civil com 25,2% da produção. Tal fato é explicado por Nunes e Santos (2015), que diz ser devido à grande capacidade do setor diversificar suas características. Logo em seguida aparece o setor de alimentos, com um percentual de consumo de 18,6%. Teixeira, Cirino, Lino (2017) afirmam que este alto índice de consumo no setor da construção civil, alimentos e bebidas, automóveis e autopeças, estão associados ao intenso crescimento que estes setores experimentaram nos últimos anos no país.

A produção de transformados plásticos no Brasil é apresentada no GRAF. 6 enfatizando o período de 2007 a 2017.

Gráfico 6 – Produção de transformados plásticos no Brasil (Em milhões de toneladas)

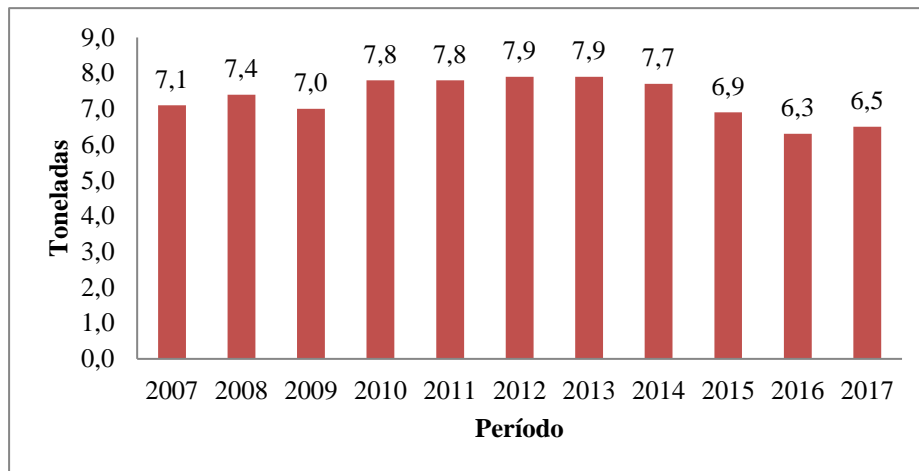


Fonte: A autora, adaptado de ABIPLAST, 2017.

O ano de 2010 teve produção recorde, atingindo a marca de 7,47 milhões de toneladas de transformados plásticos. Entretanto, entre os anos de 2016 e 2017, é possível observar um crescimento de 2,5% no volume da produção de transformados plásticos (ABIPLAST, 2017). Tal crescimento foi influenciado pelo desenvolvimento de alguns setores, como o de máquinas e equipamentos, eletrônicos e automotivos (ABIPLAST, 2018). Devido a fatores turbulentos na economia brasileira, o ano de 2018 apresentou uma queda de 10% na produção de resinas termoplásticas com relação ao ano de 2017. Havia uma expectativa de crescimento de 2,2% para o setor, entretanto a produção física de plásticos cresceu apenas 0,8% do esperado (CNQ, 2019).

O GRAF. 7 apresenta o consumo aparente de transformados plásticos em milhões de toneladas, no período de 2007 a 2017, com um crescimento aparente de 4% no último ano, sinalizando a inflexão dos dados como um todo (ABIPLAST, 2017).

Gráfico 7 – Consumo aparente de transformados plásticos (Em milhões de toneladas)

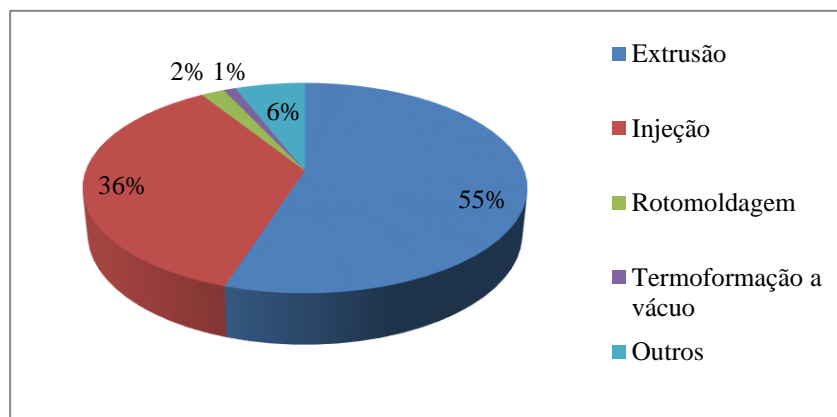


Fonte: A autora, adaptado de ABIPLAST, 2017.

No GRAF. 7 é possível observar um crescimento no período de 2017. De acordo com a Abiplast (2017), o crescimento de 4% no ano de 2017 é sinalizado pela inflexão dos dados como um todo.

De acordo com Nunes e Santos (2015), quanto às várias técnicas de produção para os materiais plásticos, elas consistem na fundição das resinas a altas temperaturas por meio de roscas até uma matriz com o formato desejado. No Brasil as técnicas utilizadas são extrusão, injeção, rotomoldagem, termoformação a vácuo e a injeção de sopro que se enquadra na categoria outros no GRAF. 8, que apresenta os processos produtivos de transformados plásticos utilizados no Brasil em 2015.

Gráfico 8 – Processos produtivos de transformados plásticos no Brasil em 2015



Fonte: A autora, adaptado de ABIPLAST, 2017.

De acordo com o GRAF. 8, a técnica mais utilizada no Brasil é a extrusão, que gera produtos para a construção civil. Em seguida vem à injeção, técnica que confere detalhes muito específicos aos produtos plásticos. A extrusão consiste em forçar a saída do plástico fundido através de um cilindro, comprimindo-o em uma matriz com o formato do material desejado (ABIPLAST, 2017).

Na injeção, o plástico é amolecido dentro de um cilindro, e sob pressão é inserido em um molde para o interior da máquina que realiza o processo, denominada injetora. Após o resfriamento, o plástico é retirado da injetora com o formato adequado (KANTOVISCKI, 2011).

A rotomoldagem consiste em um processo de transformação de materiais plásticos, utilizados para a produção de peças ocas ou abertas, na maioria das vezes de grandes dimensões (UEKI; PISANU, 2007).

A termoformação a vácuo é a técnica que permite a fabricação de utensílios descartáveis, bandejas, autopeças, etc. O processo consiste no aquecimento do material, o qual é submetido ao vácuo, eliminando todo o ar existente entre a matéria-prima e o molde (ABIPLAST, 2017).

6.1.6 Impactos ambientais causados pelo plástico

A produção de resíduos sólidos sofreu um grande aumento devido a alterações no estilo de vida e nos modos de produção e consumo decorrentes do desenvolvimento econômico e populacional. O desenvolvimento socioeconômico do Brasil não foi adequadamente acompanhado por empreendimentos de tratamento e destinação de resíduos (GOUVEIA, 2012).

Quantidades significativas de resíduos plásticos têm se acumulado nos aterros e no meio ambiente devido à sua degradação incompleta, causando impactos ambientais e problemas na gestão destes resíduos (OLIVEIRA, 2012). De acordo com Mano, Pacheco e Bonelli (2005), este fato é explicado pela contaminação sucessiva dos resíduos plásticos com resíduos alimentícios e detritos, que são acumulados no meio ambiente devido à inércia relativa à degradação ambiental.

Spinacé e De Paoli (2005) consideram os plásticos como os maiores vilões ambientais, pois podem demorar séculos para se degradarem completamente, além de ocuparem grande parte do volume dos aterros sanitários, interferindo negativamente em processos de compostagem e de estabilização biológica. Quando os plásticos são depositados indevidamente em aterros, a compactação dos resíduos e a decomposição dos materiais biodegradáveis são prejudicadas (CÂNDIDO et al., 2008).

Colabuono (2010) acredita que apesar das várias qualidades dos plásticos, eles podem causar sérios problemas ao ecossistema quando descartados de maneira incorreta. A ingestão de plásticos por aves e animais marinhos, causa danos irreversíveis aos mesmos. De acordo com Cerri (2011), as espécies marinhas confundem o plástico com alimento, o que interfere na reprodução e pode levar a morte das mesmas.

Gomes (2013) afirma em seu trabalho que, a combustão de resíduos plásticos libera substâncias tóxicas, como gás carbônico, HCl proveniente da combustão do policloreto de vinila (PVC), dentre outras substâncias que intensificam o efeito estufa. De acordo com Hess (2012), alguns plásticos possuem substâncias químicas presentes em sua estrutura, as quais podem ser prejudiciais à saúde humana, interferindo no sistema nervoso, causando inúmeras doenças devido a sua toxicidade.

O descarte incorreto dos resíduos plásticos pós-consumo, também causa entupimentos de valas e bueiros, ocasionando em enchentes que desabrigam moradores de áreas afetadas (CERRI, 2011).

Segundo (Oliveira 2012), os custos elevados e a escassez de espaço para a criação de novos aterros sanitários influenciaram a criação de técnicas alternativas para a disposição de resíduos plásticos, fazendo com que técnicas de reciclagem venham sendo cada vez mais utilizadas.

6.1.7 Reciclagem de resíduos plásticos

De acordo com Mano, Pacheco e Bonelli (2005), o descarte pós-consumo de materiais plásticos pode ser solucionado através da reciclagem, que é o resultado de várias atividades, como coleta, separação e processamento, onde materiais aparentemente sem valor são transformados em matérias-primas na manufatura de bens anteriormente feitos com matéria-prima virgem, permitindo a extensão do seu ciclo de vida para além da aplicação pretendida inicialmente.

Os materiais reciclados originam-se da fase pós-industrial e pós-consumo. Os plásticos de origem pós-industrial, quase sempre são caracterizados pela sua homogeneidade, ausência de contaminação e pelo alto valor agregado. Entretanto, os plásticos originários da fase pós-consumo, encontram-se contaminados, misturados a outros materiais e com baixo valor agregado (PINTO et al.,2012).

De acordo com Mesquita (2018), em 65 anos a produção mundial de resíduos plásticos chegou a 8,3 bilhões de toneladas, onde apenas 9% deste total foram reciclados. No Brasil cerca

de 78,3 milhões de toneladas de resíduos sólidos são gerados anualmente, das quais 13,5% (10,5 milhões de toneladas) são materiais plásticos. O país ainda destina inadequadamente cerca de 40% dos resíduos plásticos gerados, encaminhando-os a aterros sanitários e lixões, dificultando a reciclagem dos mesmos (BOEHM, 2018). De acordo com uma pesquisa da WWF (*World Wide Fund for Nature*, que significa Fundo Mundial para a vida Selvagem e Natureza) 91% (10,3 milhões de toneladas) dos resíduos gerados no Brasil, foi coletada pelo serviço urbano de limpeza. Porém somente 1,28% (145 mil toneladas) foram encaminhadas para a reciclagem. Este é um dos menores índices do mundo, abaixo da média global de 9% (VASCONCELOS, 2019).

A reciclagem permite a redução do volume de resíduos descartados em aterros, a preservação de recursos naturais, economia de energia e gera empregos, podendo ser realizada de diferentes maneiras de acordo com a origem de matéria-prima (MANO; PACHECO; BONELLI, 2005).

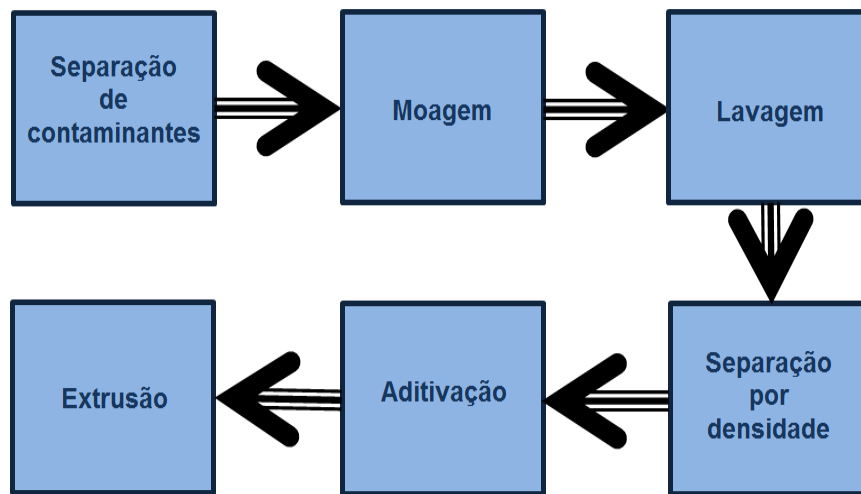
6.1.8 Tipos de reciclagem de plásticos

Existem várias formas de reaver o material polimérico existente em garrafas plásticas, embalagens, tubulações, dentre diversas fontes de materiais poliméricos (ZANIN; MANCINI, 2015).

De acordo com a origem do processo a reciclagem pode ser dividida em:

- **Reciclagem primária:** é caracterizada pela reciclagem dos resíduos com origem na indústria de transformação, os quais possuem características semelhantes às dos materiais virgens, pois não foram contaminados. Neste tipo de reciclagem os resíduos limpos são moídos e reinseridos novamente no processo (FRAGA, 2014).
- **Reciclagem secundária:** são utilizados resíduos da fase pós-consumo, compreendendo os resíduos plásticos urbanos, sendo necessário realizar diversas operações adicionais à recuperação primária, em virtude da presença de materiais contaminantes, tais como terra, resíduos orgânicos, papel, dentre outros (MANO; PACHECO; BONELLI, 2005). A FIG. 2 ilustra as etapas da reciclagem secundária.

Figura 2 – Etapas do processo de reciclagem secundária



Fonte: A autora, adaptado de FRAGA, 2014.

- Reciclagem terciária: o processo utilizado para reciclar o plástico é baseado no nível químico, promovendo a decomposição química controlada do material, visando à obtenção de monômeros, oligômeros e substâncias de baixa massa molar. Posteriormente, estes compostos obtidos serão submetidos a novos processos de polimerização, processamento e industrialização (ZANIN; MANCINI, 2015).
- Reciclagem quaternária: consiste na incineração do resíduo plástico para obtenção de energia térmica. Neste processo é realizada a queima dos resíduos poliméricos da fase pós-consumo para a recuperação de energia (MANO; PACHECO; BONELLI, 2005).

De acordo com Mano, Pacheco e Bonelli (2005), quando se toma por base o processo, a reciclagem pode ser classificada em três grupos: reciclagem mecânica, reciclagem química e reciclagem energética.

Segundo Fraga (2014), a reciclagem mecânica é a mais utilizada no Brasil e pode ser caracterizada de duas formas: reciclagem mecânica primária pós-industrial e reciclagem mecânica secundária pós-consumo. Este tipo de reciclagem está associado à reutilização de resíduos plásticos industriais ou resíduos provenientes da fase pós-consumo para produção de outros produtos plásticos (ANTUNES, 2007).

A reciclagem química está associada à reciclagem terciária, atuando no tratamento de resíduos pós-consumo por meio de reações de solvólise, pirólise e degradação termoxidativa (MANO; PACHECO; BONELLI, 2005). Ela permite a alteração da estrutura química do material residual, onde os produtos químicos resultantes poderão ser utilizados como combustíveis, monômeros e solventes industriais (FRAGA, 2014).

As reações de solvólise consistem na despolimerização com a utilização de solventes. Normalmente utiliza-se calor, entretanto em níveis acima da temperatura de fusão do polímero que se deseja despolimerizar (ZANIN; MANCINI, 2015).

As reações de pirólise e degradação termoxidativa, baseiam-se na quebra de ligações da cadeia de polímeros através de processos a altas temperaturas. Aplicam-se a polímeros como polietileno, polipropileno, poliestireno, policloreto de vinila, polimetacrilato de metila, copolímero de butadieno e estireno (MANO; PACHECO; BONELLI, 2005).

A reciclagem energética relaciona-se com a reciclagem quaternária, compreendendo a incineração de resíduos plásticos, para obtenção de energia (MANO; BONELLI, 1994). Durante o processo de reciclagem energética, recupera-se energia sob a forma de calor, para produção de vapor ou geração de energia elétrica (MANO; PACHECO; BONELLI, 2005).

6.2 Legislações ambientais e reciclagem

No Brasil não existe uma lei específica que aborde a reciclagem de forma direta, tornando-se necessário a consulta as políticas nacionais de resíduos sólidos para se tratar do assunto (OLIVEIRA, 2012).

A Lei nº 12.305/10, regulamentada pelo decreto 7.404/10 institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que trata da prevenção e redução na geração dos resíduos plásticos, dentre outros resíduos. A Lei estabelece propostas sustentáveis e um conjunto de instrumentos que visam proporcionar o aumento da reciclagem e reutilização dos resíduos sólidos, bem como a destinação ambientalmente adequada de rejeitos, instituindo a responsabilidade compartilhada dos geradores de resíduos na logística reversa dos resíduos e embalagens pós-consumo (BRASIL, 2010).

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), além do previsto na Lei 12.305/2010, aplica-se à reciclagem de resíduos sólidos as Leis 11.445/2007 e 9.974/2000. A Lei 11.445/2007 aborda as diretrizes nacionais para o saneamento básico. Para fins de resíduos sólidos a mesma estabelece em seu art. 7º atividades de coleta, transporte, triagem com o propósito de reuso ou reciclagem, tratamento e destinação final adequada dos resíduos sólidos domiciliares e urbanos (BRASIL, 2007).

A Lei 9.974/2000 altera a Lei 7.802/1989 denominada de Lei dos Agrotóxicos no intuito de inserir no art. 6º da mesma, conteúdos sobre a reciclagem das embalagens. Segundo a Lei 9.974/2000, em seu art. 6º inciso I, fica estabelecido que as embalagens de agrotóxicos e afins “devem ser fabricadas de forma a impedir qualquer vazamento, evaporação, perda ou alteração

de seu conteúdo e de modo a facilitar as operações de lavagem, classificação, reutilização e reciclagem” (BRASIL, 2000).

6.2.1 Legislações internacionais para o processo de reciclagem

Os países pertencentes à União Europeia seguem a Diretiva 96/61/EC que se refere à prevenção e ao controle integrado de contaminação (XAVIER *et al.*, 2006). De acordo com a Diretiva 96/61/EC de 24 de setembro de 1996, em seu anexo IV no ponto 11 do artigo 2º, aborda-se o desenvolvimento de técnicas de recuperação e reciclagem das substâncias produzidas e utilizadas nos processos, e eventualmente dos resíduos como elementos a se ter em conta em geral ou em casos específicos, na determinação de melhores técnicas disponíveis.

A Decisão 1999/177/CE de 8 de fevereiro de 1999 da União Europeia, estabelece as condições de derrogação para as grades de plásticos e paletes de plásticos no que diz respeito às concentrações de metais pesados estabelecidas na Diretiva 94/62/EC. As grades e paletes de plásticos englobados pela Decisão devem ser introduzidos em um sistema controlado de distribuição e reutilização (JORNAL OFICIAL DAS COMUNIDADES EUROPEIAS, 1999).

Todos os países pertencentes à União Europeia (UE) acompanham a Diretiva 94/62/EC, que estabelece as regras da UE para o gerenciamento de embalagens e resíduos provenientes de embalagens. Em 2018, criou-se a Diretiva (UE) 2018/852 do Parlamento Europeu e do Conselho, que altera a Diretiva 94/62/EC, prevenindo a produção de resíduos de embalagens, promovendo a reutilização e reciclagem dos resíduos a fim de proporcionar um aumento da reciclagem, melhorando a ambição da União Europeia de avançar frente a uma economia circular (EUR-Lex, 2018).

No início da década de 60, nos Estados Unidos, praticava-se a queima de lixo a céu aberto. Em decorrência dos fatos, em 1965 foi aprovada pelo congresso americano a Lei de Descarte de Resíduos Sólidos (*Solid Waste Disposal Act*) em inglês SWDA, como parte das emendas à Lei do Ar Limpo. A Lei de Descarte dos Resíduos Sólidos foi a primeira lei federal onde se exigia métodos ambientalmente corretos para o descarte adequado dos resíduos sólidos gerados no país (EPA, 2018).

Em 1976 a Lei de Descarte dos resíduos sólidos foi complementada pela Lei de Conservação e Recuperação de Recursos (*Resource Conservation and Recovery Act*) RCRA em inglês, visando solucionar a enorme geração de resíduos sólidos nos Estados Unidos. A chamada Lei de Conservação e Recuperação de Recursos é a principal lei que rege o gerenciamento de resíduos sólidos nos Estados Unidos sendo aprovada pelo congresso

americano em 21 de outubro de 1976, e tem como objetivos estabelecidos: proteção da saúde humana e do meio ambiente aos perigos potenciais da disposição de resíduos, conservação de energia e dos recursos naturais, redução dos resíduos gerados e garantir de forma ambientalmente adequada o manejo dos resíduos (JURAS, 2012).

No ano de 1990, entrou em vigor a Lei de Prevenção da Poluição, em inglês chamada de *Pollution Prevention Act*, que se refere a redução de resíduos na fonte geradora, e a valorização dos resíduos que não possam ser evitados ou reciclados (COSTA; DUARTE; LEMOS, 2015).

6.3 Combustíveis

De acordo com Pagliuso² (1984 *apud* SOUZA, 2005) combustível é toda substância química capaz de reagir quimicamente com outra em uma reação exotérmica de combustão. Entende-se por combustão, a reação onde ocorre a conversão de combustível em energia, na forma de calor e luz (TURNS, 2013).

Os combustíveis se dividem em três classes: sólidos, líquidos e gasosos (SHREVE; BRINK, 2014). Dentre os combustíveis sólidos destacam-se o carvão e a madeira. Dentre os combustíveis líquidos estão os combustíveis minerais (animais e vegetais fossilizados) conhecidos como combustíveis fósseis, originários de uma série de transformações físico-químicas de matéria viva deteriorada, existente há milhares de anos na Terra. Os combustíveis gasosos são formados por gás natural, uma substância composta por hidrocarbonetos que se conservam em estado gasoso em condições atmosféricas normais (OLIVEIRA, 2018; PÍTSICA, 2015).

6.3.1 Petróleo

O petróleo é um óleo mineral, de cor escura e cheiro forte, constituído basicamente por hidrocarbonetos. Através de seu refino são obtidos diversos componentes que permitem a obtenção de variados combustíveis e matérias-primas (PÍTSICA, 2015). Este combustível fóssil é componente de mais de seis mil produtos e matéria-prima essencial à vida moderna. Através do petróleo são produzidos gasolina, combustível de aviação, lubrificantes, borrachas, plásticos, tecidos sintéticos, tintas e energia. A formação do petróleo resulta da ação da natureza, que

² PAGLIUSO, Josimar Davilson. **Combustível e combustão**, 1984. São Carlos: EESC/USP. Apostila.

transformou o material orgânico proveniente de restos de animais e vegetais depositados há milhões de anos no fundo dos mares em óleo e gás (ROSA; GAUTO 2011).

O petróleo bruto é constituído por frações dos seguintes compostos: 84% de carbono, 14% de hidrogênio, 1 a 3% de enxofre, menos de 1% de nitrogênio, menos de 1% de oxigênio, menos de 1% de metais e por fim menos de 1% de sais (FREUDERINCH, 2001). Após a extração, o petróleo bruto é levado para as grandes refinarias, onde ocorrerá a separação da mistura de hidrocarbonetos que compõem o petróleo (FERREIRA, 2018).

Cada refinaria possui um conjunto próprio de operações, que visam atender as propriedades específicas de cada óleo. O refino do petróleo é realizado em três etapas, as quais são comuns a qualquer tipo de petróleo: destilação, conversão e tratamentos finais (FIGUEIREDO, 2017; TOLENTINO, 2015).

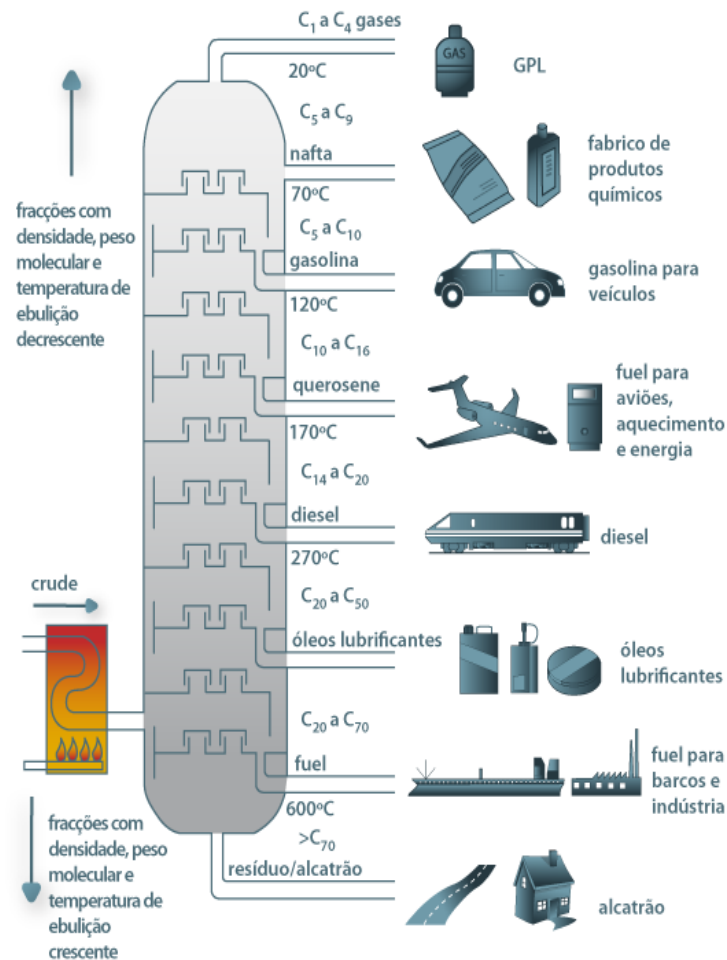
A destilação é a etapa onde as frações dos compostos presentes no petróleo são separadas através do aquecimento do mesmo até sua evaporação, com base na diferença dos pontos de ebulição das misturas que o compõe. Ao atingirem pontos de ebulição específicos, as frações dos compostos presentes no petróleo volatizam-se e sobem para o topo da coluna de destilação, onde posteriormente são resfriadas em um condensador voltando ao estado líquido novamente (FIG. 3). Através do processo de destilação do petróleo são gerados os seguintes produtos: naftas, gás natural, gasolina, querosene, óleo diesel, óleos lubrificantes óleos combustíveis e asfalto ou betume (QUEVEDO, 2016 a). O QUADRO3 especifica as principais frações do petróleo, separadas de acordo com seu ponto de ebulição.

Quadro 3 - Especificações das principais frações do petróleo

Ponto de ebulição (°C)	Composição (nº de carbonos)	Subproduto
20	1 a 4	Gás
70	5 a 9	Nafta
120	5 a 10	Gasolina
170	10 a 16	Querosene
270	14 a 20	Diesel
340	20 a 50	Lubrificantes
500	20 a 70	Óleo combustível
600	Acima de 70	Asfalto

Fonte: FIGUEIREDO, 2017.

Figura 3 – Torre de destilação do petróleo



Fonte: Portal de Engenharia Química, 2008.

De acordo com Figueiredo (2017), na conversão do petróleo as frações mais pesadas provenientes do refino são convertidas em moléculas de maior valor agregado. Além dos diversos compostos presentes no petróleo, outras substâncias também são encontradas no combustível bruto, tais como nitrogênio, oxigênio, enxofre e metais, as quais precisam passar pela etapa de tratamento para serem removidas. No processo de tratamento realiza-se a adequação dos derivados à qualidade exigida no mercado.

6.3.2 Transformação do petróleo em gasolina

A gasolina é uma complexa mistura de hidrocarbonetos um tanto quanto voláteis, os quais podem variar de 5 a 12 carbonos, sendo, portanto, uma mistura de hidrocarbonetos líquidos, voláteis e inflamáveis (parafínicos, isoparafínicos, oleofínicos, naftênicos e aromáticos) e em quantidades inferiores, de produtos oxigenados (ANP, 2019; FLUMIGNAN,

2005). De acordo com Lima (2018), o processo de transformação do petróleo em gasolina começa na separação física dos seus componentes, através do aquecimento do petróleo nas refinarias, em um processo denominado de destilação atmosférica.

Na fase final de produção da gasolina, é realizada a extração de boa parte do enxofre do combustível, resultando em uma gasolina conhecida como gasolina tipo A, com baixo teor dessa substância. Este tipo de gasolina sai das refinarias sem nenhum tipo de aditivo e segue direto para as distribuidoras, onde por lei é realizada a adição de etano anidro, visando aumentar a octanagem do combustível e redução da emissão de poluentes na atmosfera (ROYAL FIC, 2016). A gasolina com adição de etano anidro é denominada de gasolina tipo C, sendo este o combustível disponibilizado nos postos revendedores para venda ao consumidor final (ANP, 2019).

6.3.3 Óleo Diesel

O óleo diesel é um combustível derivado do petróleo constituído principalmente por hidrocarbonetos parafínicos, oleofínicos, aromáticos e com baixas proporções de enxofre, nitrogênio e oxigênio (FERREIRA). Trata-se de um combustível oleoso, tóxico, inflamável, pouco volátil, límpido e com odor característico (QUEVEDO, 2016 b).

Através do processo de destilação atmosférica decorrente do refino do petróleo, obtêm-se as frações básicas para a produção de óleo diesel, denominadas de óleo diesel leve e pesado. A estas frações são adicionadas outras frações como a nafta, o querosene e o gasóleo leve de vácuo, gerando o produto conhecido como óleo diesel (PETROBRAS, 2014). A agregação destas frações, dentre outras obtidas no refino do petróleo, provém da demanda global de consumo de derivados de petróleo (Martins et al., 2015).

De acordo com a ANP (2016), o óleo diesel é utilizado principalmente em motores de combustão interna e ignição por compressão (ciclo Diesel), em veículos rodoviários, ferroviários e marítimos e em geradores de energia elétrica. Visando a satisfação do mercado consumidor, vários tipos de diesel são encontrados no mercado brasileiro:

- Óleo diesel (S10 e S5000) de uso rodoviário;
- Óleo diesel S18000 de uso não rodoviário;
- Óleo diesel DMA/DMB.

6.3.4 Etanol

O etanol, ou álcool etílico (C_2H_5O), é caracterizado como um líquido incolor, de odor ardente, chama azulada, facilmente inflamável e com grande absorção de água. Com índice de octanagem superior ao da gasolina, o etanol apresenta-se como um excelente combustível automotivo, podendo ser utilizado no Brasil de duas formas: na forma de etanol anidro e etanol hidratado. O etanol anidro possui uma menor quantidade de água em sua composição, sendo o mais adequado para mistura carburante com a gasolina. Já o etanol hidratado é o etanol comercializado em postos de combustíveis (CINELLI, 2012; MACHADO; ABREU, 2006).

O etanol é um biocombustível que pode ser utilizado em motores de combustão interna com ignição por centelha, como principal substituto da gasolina, em contraponto a outros combustíveis fósseis. Tal substância é produzida especialmente por meio da fermentação de açúcares (ANP, 2018). De acordo com Lima et al. (2001), pode-se obter etanol de três maneiras gerais: por via destilatória, por via sintética e por fermentação. Entretanto, devido à grande disponibilidade de matérias-primas naturais existentes no país, a via fermentativa é a mais atraente do ponto de vista econômico no Brasil. O fluxograma representado pela FIG. 4 mostra o processo de produção de etanol, a partir da cana-de-açúcar.

O Brasil é produtor de etanol de 1ª e 2ª geração. A diferença das plantas industriais de 1ª e 2ª geração encontra-se nas etapas de pré-tratamento e hidrólise da celulose antes de iniciar a fermentação na produção do etanol de 2ª geração (ANP, 2016). O etanol de 2ª geração é o etanol produzido com resíduos de cana-de-açúcar e do milho (MINAS PETRO, 2016).

Figura 4 - Processo de produção de etanol a partir de cana-de-açúcar



Fonte: A autora, adaptado de DIAS, 2008.

6.4 Pirólise

O processo de pirólise é definido genericamente como um procedimento de decomposição de resíduos por aquecimento, na ausência de oxigênio (OLIVEIRA et al. 2009). A pirólise na maioria das vezes, ocorre na ausência de ar devido a questões relacionadas a qualidade e segurança do processo (ASSUMPCÃO, 2018). Atualmente a produção de hidrocarbonetos líquidos, que possam ser utilizados como combustíveis ou como matéria-prima para determinadas indústrias constitui o principal objetivo da pirólise (PARADELA, 2007). Termos como decomposição térmica, craqueamento e degradação térmica são amplamente empregados na literatura de forma análoga a pirólise (FIGUEIREDO *et al.*, 2015).

A pirólise pode ser classificada de acordo com as características dos processos existentes, como por exemplo, sistemas de altas temperaturas e sistemas convencionais. Ainda existem os sistemas destinados a fins específicos para a produção de certos elementos químicos na forma líquida, sólida ou gasosa (LIMA, 2004). Os variados tipos de pirólise existentes se diferem através dos parâmetros operacionais em que o processo ocorre, como a temperatura de reação utilizada, pressão, velocidade de aquecimento do reator, gás de inertização e tempo de residência no meio reacional (PARADELA, 2007).

De acordo com Costa (2006), existem dois tipos de pirólise, a lenta onde a reação ocorre em baixas temperaturas, maximizando a porcentagem de sólido carbonoso e a pirólise rápida ou *flash*, que possui o objetivo de maximizar os produtos gasosos ou líquidos. Enfatiza-se neste trabalho, a pirólise de resíduos plásticos, bem como as vantagens e desvantagens abrangidas pelo processo.

De acordo com Silveira (2015), é possível produzir diferentes quantidades de produtos gasosos, líquidos ou sólidos a partir da pirólise. Os produtos gasosos obtidos durante o processo termoquímico são constituídos por hidrogênio e hidrocarbonetos, os quais são utilizados na geração de energia. O resíduo carbonoso gerado durante este processo é utilizado na indústria do aço, para produção de carvão ativado, dentre outras finalidades. Os produtos líquidos se assemelham aos obtidos com base no petróleo, tendo o seu processamento realizado por tecnologias semelhantes à dos processos petrolíferos, tais como, destilação, polimerização, alquilação, isomerização, hidrogenação, etc. Os produtos líquidos obtidos podem ser utilizados diretamente como combustíveis, convertidos posteriormente em combustíveis de segunda ordem, os quais possuem um enorme valor para a indústria química (COSTA, 2006).

Para que ocorra a pirólise é necessário, fornecer calor ao reator pirolítico (QUADRO 4) (PENSAMENTO VERDE, 2013). Segundo Assumpção et al. (2018), o reator pirolítico possui três zonas específicas:

- **Zona de secagem:** Ocorre a alimentação do reator, onde os resíduos passam pela etapa de pré-secagem e secagem. A temperatura do reator é mantida na faixa de 100 a 150°C, pelos gases provenientes da zona de pirólise os quais são reutilizados no processo;
- **Zona de pirólise:** Ocorre a volatilização, oxidação e fusão. Nesta zona as temperaturas oscilam de 150°C a temperaturas acima de 400°C, chegando até 1600°C (conforme os produtos de interesse). Produtos como álcoois, óleo combustível, alcatrão, gases etc., podem ser coletados.
- **Zona de resfriamento:** Coleta-se os resíduos gerados pela pirólise, tais como char (carbono puro), cinzas e escória.

Quadro 4 – Principais reatores utilizados no processo de pirólise

Tipo de Reator	Características particulares
Extrusora	Temperatura de operação limitada. É essencial que os produtos da decomposição sejam coletados antecipadamente.
Reator tubular	Reator simples
Reator de tanque com mistura, com possível aquecimento externo e/ou resfriamento.	Reator de fase líquida convencional. A agitação melhora a transferência de calor. Deve-se evitar o entupimento dos dutos a jusante
Reator vertical	Escoamento gravitacional.
Reator de leito fixo	Usado principalmente em reações catalíticas.
Reator com banho salino	O banho age com um agente de transferência de calor. Os resíduos se acumulam no topo da camada de sal, exigindo parada periódica para limpeza.
Reator de leito fluidizado	O leito age como um agente de transferência de calor, dispensando o plástico fundido em camadas finas. Os resíduos são carregados com os produtos, exigindo filtração rigorosa dos finos (pigmentos e preenchimentos).
Forno rotativo	Unidade simples, caracterizada por fluxo rotativo.

Fonte: BUEKENS, 2006.

6.5 Pirólise de resíduos plásticos

Paradela (2007) descreve a pirólise como um processo de tratamento apropriado especialmente para a reciclagem química de resíduos plásticos, uma vez que em comparação com a reciclagem física é mais factível à presença de impurezas e contaminantes, permitindo a utilização de uma ampla gama de tipos de plásticos a serem reciclados. Este aspecto constitui a principal vantagem da pirólise (COSTA, 2006).

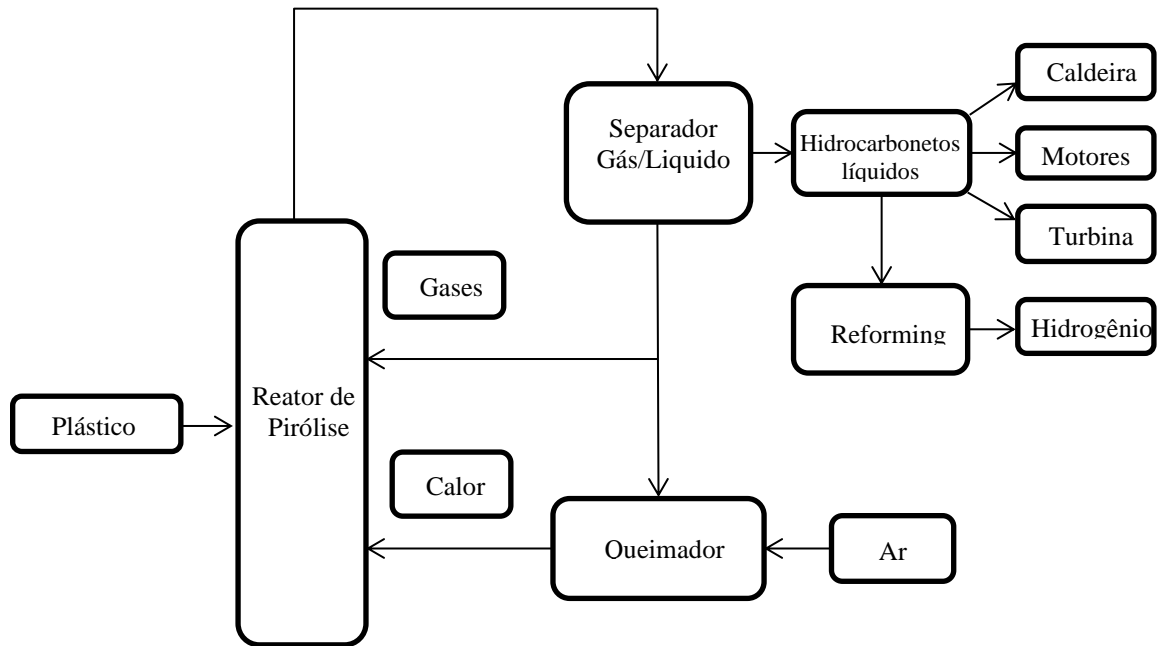
De acordo com Junior (2017), na pirólise de polímeros ocorre a despolimerização e a formação de compostos aromáticos de baixa massa molecular ($C_2 - C_4$), também ocorre à formação de líquidos de cadeias longas, e altas temperaturas de ebulição, como por exemplo, ceras e poliolefinas.

Segundo Mano, Pacheco e Bonelli (2010), o processo pirolítico de resíduos poliméricos consiste no rompimento de ligações da cadeia do polímero através de procedimentos termolíticos, que se aplicam a polímeros com ligação carbono-carbono na cadeia principal. O rompimento das ligações, provoca a formação de moléculas menores e com radicais livres (SANTOS, 2018). Neste processo térmico a degradação de polímeros é realizada através do aquecimento do material a elevadas temperaturas em atmosfera inerte, podendo ou não utilizar nitrogênio como gás mediador, contribuindo assim para a fragmentação das macromoléculas em frações menores (SILVEIRA, 2015; SOUZA, 2009).

Segundo Costa (2006), na pirólise são utilizadas temperaturas moderadas e pressões que não excedam a pressão atmosférica. A pirólise realizada a uma baixa pressão permite que os radicais livres formados no rompimento das ligações carbono-carbono, retornem ao processo até formarem radicais menores, até o hidrogênio. Estes radicais podem reagir com o hidrogênio formando compostos gasosos como etano, eteno, propano, entre outros (SANTOS, 2018). De acordo com Silveira (2015), a pirólise normalmente acontece em uma faixa de temperatura relativamente baixa, podendo variar entre 250°C e 700°C, com base no produto que se deseja obter. Mano, Pacheco e Bonelli (2010) propõem que temperaturas mais altas contribuem para a formação de produtos gasosos, enquanto temperaturas mais baixas favorecem a geração de produtos líquidos.

A pirólise transforma os plásticos em um gás, que posteriormente é condensado em forma de líquido. Este líquido é fracionado através da decantação, e a fase sólida proveniente do processo é decantada, sujeita a um processo sólido-líquido (SAIOTE, 2012). Vê-se através da FIG.5 o fluxograma referente ao processo de pirólise de resíduos plásticos.

Figura 5 – Processo pirolítico de resíduos plásticos



Fonte: COSTA, 2006.

Gonçalves (2007) propõe em seu trabalho que através do processo de pirólise, alguns polímeros podem ser convertidos parcialmente em seus monômeros de origem, como por exemplo, o poliestireno (PS), que ao ser aquecido tem sua maior parte transformada no monômero estireno. A seguir será abordado a pirólise de diversos tipos de plásticos.

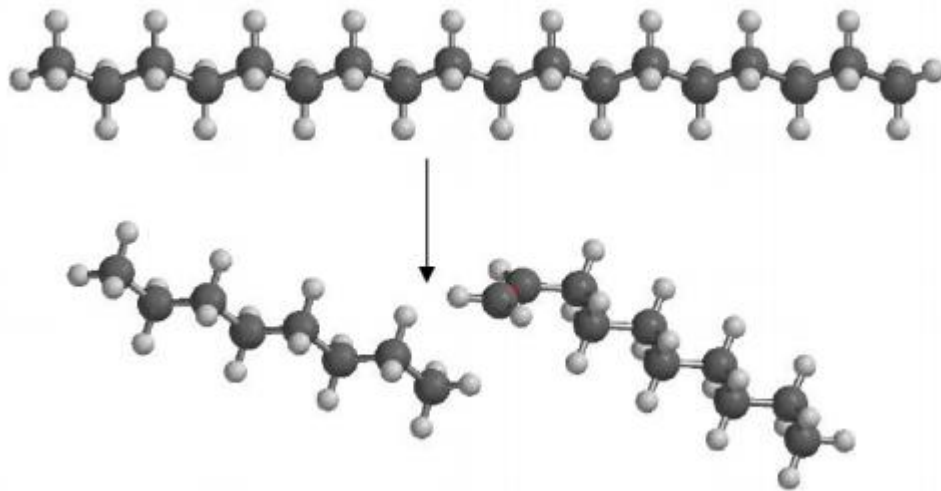
6.5.1 Pirólise de polietileno

De acordo com Junior (2017), o polietileno (PE), é um dos plásticos mais consumidos no mundo. Os polietilenos dividem-se basicamente em cinco tipos principais: polietilenos de baixa densidade (PEBD), polietilenos de alta densidade (PEAD), polietileno de baixa densidade linear (PEBDL), polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM) e polietileno de ultrabaixa densidade (PEUBD) (LONTRA, 2011). Segunda Costa (2006), o PEAD é um polímero altamente linear, enquanto o PEBD possui algumas ramificações em sua estrutura. Devido a esta diferença estrutural em suas cadeias, a degradação térmica do PEBD ocorre a temperaturas mais baixas que a do PEAD.

A decomposição do polietileno de alta e baixa densidade possui início a 290°C, quando ocorre a quebra das ligações fracas e posteriormente das ligações carbonos terciários, dando origem a óleos e ceras constituídos por alquenos, alquinos e alcadienos com quase nenhuma

cinza, sendo o eteno e etileno alguns dos constituintes dos voláteis primários (GONÇALVES, 2007). Paradela (2007) propõe em seu trabalho, que a degradação do polietileno se inicia em 350°C devido a cisões aleatórias em sua cadeia, ocorrendo a diminuição da massa molar do polímero, assim como é possível observar através da FIG. 6. Ao decorrer da degradação térmica, produtos com maior densidade e líquidos são formados, logo após um tempo avançado de degradação, aumenta-se a produção de compostos insaturados nos produtos.

Figura 6 – Degradação aleatória do polietileno



Fonte: AFONSO, 2013.

De acordo com Paradela (2007), a degradação térmica do PEBD ocorre a temperaturas um pouco inferiores à do PEAD respectivamente 417°C e 447°C, entretanto ambos os polímeros são volatilizados completamente a temperaturas inferiores a 500°C. Ainda de acordo com Paradela (2007), a maioria dos estudos sobre pirólise de polietileno encontrados na literatura, abordam a pirólise deste polímero em temperaturas elevadas, normalmente acima de 600°C.

Kaminsky³ (1985 *apud* COSTA, 2006, p.37) estudou a pirólise de PE (com o tipo não especificado), em um reator de leito fluidizado, com temperaturas entre 650 e 810°C, onde os principais produtos obtidos foram hidrocarbonetos leves, com um alto percentual de olefinas (tais como etileno, propileno, ciclopentadieno) e compostos aromáticos, como benzeno e tolueno. Identificou-se também, porém em menor quantidade, os compostos metano e hidrogênio. Ao aumentar a temperatura da reação, observou-se que a concentração de propileno

³ KAMINSKY, W. **Thermal recycling of polymers.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 8 (1985) 439-448.

diminuiu, o etileno atingiu concentração máxima a temperatura de aproximadamente 740°C e o benzeno aumentou até atingir o valor máximo de 25% (m/m) a uma temperatura mais elevada.

Darivakis *et al.*⁴(1990 *apud* PARADELA, 2007, p. 47), realizaram o procedimento de pirólise do PE (com o tipo não especificado), em um forno aquecido eletricamente sob fluxo de hélio, onde a perda de massa do polímero foi praticamente total na temperatura de 700°C. Neste procedimento, recolheu-se duas frações de produtos, gases e líquidos condensáveis, formados por alcatrões e produtos provenientes de volatilizações com elevada massa molecular.

Siauw⁵ (1990 *apud* COSTA, 2006, p. 38) estudou a pirólise do PE (com o tipo não especificado) em um reator tubular com temperatura entre 450 e 500°C, e em um sistema fechado utilizando o mesmo reator tubular, entretanto, o reator encontrava-se selado a uma temperatura de 480°C. Verificou-se que no sistema fechado a fração de destilado foi maior, assim como a de gases e sólidos também tiveram um aumento. Porém, no sistema em aberto a produção de nafta foi menor, em contraste com a produção de gasóleo que foi maior.

Kumar e Singh (2011) realizaram o estudo da pirólise de PEAD pós-consumo no mesmo sistema experimental, na mesma faixa de temperatura de 450 a 500°C. Observou-se através dos resultados os principais produtos formados, como um líquido viscoso e uma cera sólida, ambos formados a temperaturas abaixo de 475°C. Constatou-se ainda que existe uma relação entre o tempo de residência para o polietileno pós-consumo e o rendimento em óleo.

Kumar e Singh (2013) desenvolveram a pirólise de PEAD virgem, em um reator de aço, trabalhando no regime semi-batelada a uma faixa de temperatura de 450 a 500°C, onde buscavam a otimização da fração líquida obtida no processo. Através de uma análise química do óleo produzido no processo, constatou-se a presença de alcanos, alcenos, álcoois, ésteres, éteres, ácidos carboxílicos. Kumar e Singh (2013), ainda observaram fisicamente características similares as de produtos petroquímicos no óleo resultante da pirólise.

⁴ DARIVAKIS, G. S.; HOWARD, J.B.; PETERS, W.A. **Releases rates of condensables and total volatiles from rapid devolatilization of PE and PS.** Combustion Science Technology 74 (1990), 267-281.

⁵ SIAUW, H. Ng. **Conversion of Polyethylene to Transportation Fuels through Pyrolysis and Catalytic Cracking.** Energy & Fuels, 9 (1990) 735-742

6.5.2 Pirólise de Polipropileno

O polipropileno (PP) possui pertence ao grupo dos polímeros poliolefinicos. Tal polímero é obtido através da polimerização do propileno, o qual é obtido pela destilação do petróleo, em um processo a altas pressões e na presença de catalisadores (BRÁS, 2011). O PP é um dos polímeros com maior índice de consumo, que se diferencia do PE devido à presença de um grupo metilo em sua estrutura (JUNIOR, 2017; COSTA, 2006).

A degradação térmica do polipropileno ocorre por meio de uma reação radicalar onde os radicais iniciadores possuem formação na ação do calor, levando a cisão da cadeia de forma semelhante à cisão que ocorre na cadeia do PE. As etapas da reação consistem em iniciação, propagação, ramificação de cadeia e terminação, formando-se assim produtos saturados e insaturados (HAMID, 2000; FIGUEIREDO *et al.*, 2015). Segundo Costa (2006) a eventual quebra da cadeia do PP leva a produção de radicais primários e secundários, e conseqüentemente radicais terciários, formados a partir de reações nas quais ocorre a transferência intermolecular de hidrogênio.

Assim como Costa (2006) descreveu em seu levantamento bibliográfico, todos os produtos finais oriundos da pirólise de PP resultaram na divisão de três frações: gases, líquidos e resíduos sólidos. Os gases gerados pelo processo são compostos por hidrocarbonetos constituídos de um a cinco carbonos. Os líquidos por alcanos, alcenos e compostos aromáticos. Ainda de acordo com Costa (2006), a proporção dos produtos e a composição dos mesmos, sofrem interferência pelo tipo de reator e condições experimentais utilizadas.

Kaminsky *et al.*⁶ (1995 *apud* PARADELA, 2007, p. 51), usou um reator de leito fluidizado para efetuar a pirólise de PP a uma temperatura de 740°, onde obteve cerca de 57% de gases (em sua maioria metano, etileno e propileno) e 40% de fração líquida, onde foi possível considerar porcentagens análogas de compostos alifáticos, aromáticos e uma quantidade considerável de benzeno e tolueno.

Wong *et al.*⁷ (2000 *apud* JUNIOR, 2017, p. 35) realizou a pirólise de PP em um reator batelada, a uma temperatura de 420°C. A reação teve vários tempos, variando entre 10 e 180 minutos. Aos 90 minutos de reação, foi possível obter uma conversão de 60%, sendo possível obter predominantemente a presença de alcanos e alcenos, e em proporções menores a presença

⁶ KAMINSKY, W.; SCHLESSELMANN, B.; SIMON, C. **Oleofins from polyolefins and mixed plastics by pyrolysis.** *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 32, (1995), 19-27.

⁷ WONG, S. L. *et al.* “**Current state and future prospects of plastic waste as source of fuel: A review**”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 50, p. 1167–1180, 2015.

de aromáticos e dienos. Analisou-se que o tempo de reação demonstrou influência na produção de hidrocarbonetos leves, quebrando os hidrocarbonetos de cadeia longa.

De acordo com os ensaios de Wong e Broadbelt⁸ (2001 *apud* COSTA, 2006, p. 49) realizados em um reator descontínuo, com temperaturas entre 350 e 420°C, foi possível verificar um acréscimo na conversão com o aumento da temperatura e o tempo de residência. A reação atingiu o equilíbrio aos 90 minutos de reação, quando a temperatura encontrava-se a 420°C, e aos 180 minutos de reação foi possível alcançar novamente o equilíbrio, estando a temperatura em 350°C. Os produtos obtidos dividiam-se em quatro categorias: alcanos, alcenos, dienos e aromáticos.

A literatura é deficiente quanto a informações disponíveis sobre a influência das condições experimentais no processo de pirólise do PP, tornando-se inconclusivo as condições mais favoráveis de serem utilizadas. Entretanto, apenas quanto ao efeito da temperatura na pirólise de PP é possível concluir que o uso de temperaturas mais baixas, torna-se vantajoso quando se deseja maximizar a produção de líquidos (COSTA, 2006).

6.5.3 Poli (tereftalato de etileno)

De acordo com Romão, Spinacé e Paoli (2009), o poli(tereftalato de etileno) comumente chamado de PET, é um dos termoplásticos mais produzidos no mundo. Tal sucesso deve-se ao fato do polímero possuir uma ampla gama de aplicações, bem como excelente relação entre as propriedades mecânicas e térmicas, e custo de produção.

O PET é produzido industrialmente, através da esterificação direta do ácido teraftálico com etileno glicol, por meio de um processo conduzido em massa, a altas temperatura e pressão, chamado de policondensação (JUNIOR, 2017).

Dziociol e Trzeszczyński⁹ (2000 *apud* FIGUEIREDO *et al.*, 2015, p. 1155) realizaram a pirólise do PET em um forno tubular, com atmosfera inerte e temperaturas variando na faixa de 200 a 700°C. Obtiveram como produto final da pirólise, substâncias voláteis como monóxido de carbono, dióxido de carbono, acetaldeído, hidrocarbonetos alifáticos, acetofenona e benzeno. Observou-se que a temperaturas mais elevadas, os produtos mais voláteis provenientes da pirólise do PET, tornaram-se mais complexos.

⁸ WONG, His-Wu; BROADBELT, Linda J. “**Tertiary Resources Recovery from Waste Polymers via Pyrolysis:** Neat and Binary Mixtures of Polypropylene and Polystyrene.” *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 40 (2001), 4716-4723.

⁹ DZIOCIOL, M.; TRZESZCZYNSKI, J. **Volatile Products of Poly (ethylene terephthalate)**. *Thermal. Journal of Applied Polymer. Science* 2000, v.77, 1894.

Çit *et al.*¹⁰ (2010 *apud* FIGUEIREDO *et al.*, 2015, p. 1156) estudaram a pirólise de PET em um reator tubular, com atmosfera inerte, variando as temperaturas entre 400, 500, 600 e 700°C. Observou-se ao final, que a pirólise de PET leva a formação de alcatrão, que possui formação aromática:

Dimitrov *et al.*¹¹ (2013 *apud* Junior 2017, p. 39) efetuaram a degradação térmica de PET virgem a uma temperatura de 600°C, acoplado a cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massas (CG-MS), encontrando alguns dos mesmos produtos identificados nos trabalhos citados acima, tais como, o CO₂, benzeno, benzoato de vinila, tereftalato de divinila, ácido benzoico e 4-viniloxicarbonil-ácido benzoico. Confirmou-se neste estudo, a ocorrência da degradação térmica pela cisão do éster, produzindo ácido carboxílico e grupos terminais insaturados.

A pirólise do PET contribui tanto para obtenção de combustível, como para a obtenção de substâncias químicas utilizadas como matérias-primas na geração de novos produtos, eliminando o risco de que novas embalagens para fármacos e alimentos sejam produzidas com o PET reciclado, além de reduzir os custos de pré-tratamento para reciclagem do polímero (FIGUEIREDO *et al.*, 2015).

6.5.4 Poliestireno

Borrely (2002) classifica o poliestireno PS, como um polímero comum, sintetizado a partir do monômero estireno. De acordo com Paradela (2007), o PS é um polímero que aparece com grande recorrência nos resíduos domésticos e industriais. Ainda de acordo com Paradela (2007), a degradação térmica do PS, ocorre a temperaturas relativamente baixas, onde estudos termogravimétricos mostraram que a degradação tem início aproximadamente em 350°C, com a liberação de voláteis, provenientes da perda de massa do polímero.

Sin *et al.*¹² (1976 *apud* COSTA, 2006, p. 56) estudaram a pirólise de PS em um reator de leito fluidizado a 640 e 740°C, e obtiveram respectivamente 79,8 e 71,6% do monômero estireno.

¹⁰ ÇIT, İ.; SINAG, A.; YUMAK, T.; UÇAR, S.; MISIRHOGLU, Z.; CANEL, M. **Comparative pyrolysis of polyolefins (PP and LDPE) and PET**. *Polymer Bulletin* v. 64, n. 8, p. 817–834, 2010.

¹¹ DIMITROV, N. *et al.* **Analysis of recycled PET bottles products by pyrolysis gas chromatography**. *Polymer Degradation and Stability*, v. 98, n. 5, p. 972–979, 2013.

¹² SINN, H.; KAMINSKY, J.; JANNING, J. **Processing of plastic waste and scrap tires into chemical raw materials, especially by pyrolysis**. *Anewandte Chemie International Edition in English*, 15 (1976), p. 660-672.

Em um reator de leito fixo Zhang et al. (1995 *apud* PARADELA, 2007, p. 52) efetuaram a pirólise de PS a uma temperatura de 350°C, sob fluxo de nitrogênio, obtendo uma conversão de 80% e uma seletividade de 70% para produção de estireno. Além do etileno, também foi identificado produtos como, dímero de estireno, α -metilestireno, tolueno e etilbenzeno. Entretanto nem todos os estudos mostraram o estireno como produto principal da pirólise. Carniti et al.¹³ (1991 *apud* PARADELA, 2012, p. 37) mostraram controvérsias, onde os principais produtos obtidos na pirólise de PS a uma faixa de temperatura de 360-420°C, utilizando tubos de vidros selados sob vácuo, foram tolueno e etilbenzeno.

Kaminsky, Predel e Sadiki (2004), constataram um rendimento de 75% de estireno e 10% de oligômeros, quando utilizaram o polímero PS na alimentação de um reator pirolítico de leito fixo.

Gonçalves (2007) descreveu em sua pesquisa que, a decomposição do poliestireno tem início a uma temperatura de 364°C. Nas temperaturas de 532-708°C, é produzido um líquido com 75% de estireno, juntamente com hidrocarbonetos policíclicos e aromáticos. Segundo Junior (2017), a pirólise de PS possui um alto rendimento quanto a compostos aromáticos, isso se deve a natureza policíclica do polímero.

Paradela (2012) observou que na maioria dos trabalhos existentes na literatura, o principal produto obtido pela pirólise do PS é o próprio monômero de partida, o estireno. Tal fato foi observado tanto a altas temperaturas como a baixas temperaturas. Isso se relaciona com o que Costa (2006) propôs em seus estudos, onde também afirma que o produto final obtido em maior quantidade é o próprio monômero estireno. Costa (2006) ainda ressaltou, que este fato também é independente do tipo de reator utilizado no procedimento de pirólise do PS.

6.5.5 Policloreto de Vinila

O Policloreto de Vinila (PVC) é considerado um polímero de baixa cristalinidade ou amorfo, variando esta propriedade de acordo com as condições de polimerização. Tal polímero possui uma grande versatilidade devido à capacidade de agregar aditivos antes de ser transformado no produto final. A presença de cloro na estrutura do PVC garante ao polímero uma alta polaridade, aumentando e permitindo a afinidade do mesmo com uma ampla gama de

¹³ CARNITI, P.; BELTRAME, P. L.; ARMADA, M.; GERVASINI, A.; AUDISIO, G. **Polystyrene thermodegradation. 2.** Kinetics of formation of volatile products. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 30 (1991), 1624-1629.

aditivos. É possível citar como aplicação do PVC os seguintes segmentos: embalagens, solados de calçados, construção civil e plastificantes (ZAIONCZ, 2004).

Spinacé e De Paoli (2005) classificaram o PVC como um polímero sintético, da classe dos termoplásticos. Segundo Junior (2017), o PVC possui 43% de hidrocarbonetos e 57% de cloro presentes em sua composição, tendo sua produção baseada na reação entre o cloro obtido do sal de mina e eteno. A degradação térmica deste polímero inicia-se a 130°C, nota-se que a temperatura de degradação do PVC é inferior à temperatura dos demais polímeros. Junior (2017) explica este fato, propondo que o polímero “é reconhecidamente um material de baixa resistência térmica”.

De acordo com a pesquisa realizada por Castro (2013), a pirólise do PVC é considerada por diversos autores como uma técnica promissora, pois o cloro pode ser libertado e recuperado na forma de ácido clorídrico ou cloreto, através da quebra das ligações do cloro por degradação térmica.

Najjar *et al.* (2014), estudaram a pirólise do PVC visando avaliar os efeitos da temperatura, tamanho de grão e tempo de aquecimento, obtendo 14% de óleo de pirólise, 28% de cinzas. Facilitando o processo de separação dos produtos, 95% do HCl presente nas amostras foi emitido antes de iniciar o processo de pirólise.

Saeed *et al.*¹⁴(2004 *apud* JUNIOR, 2017, p.23) realizaram a pirólise lenta do PVC em um reator de leito fluidizado, variando as temperaturas. Observou-se através deste estudo que a liberação de cloro e de outros componentes está ligada diretamente à temperatura.

6.6 Pirólise Catalítica

A pirólise catalítica consiste na utilização de um catalisador adequado durante o processo de degradação. Termos como, degradação catalítica e craqueamento catalítico são utilizados para definir o processo. A presença do catalisador no processo de pirólise pode diminuir a temperatura e o tempo de reação, gerando produtos com melhor qualidade e maior valor agregado através de plásticos residuais (MONTEIRO, 2018). Valle, Guimarães e Sampaio (2004), também apontaram em seu trabalho que os catalisadores atuam de forma acentuada na redução das temperaturas de reação, considerando este fato como uma medida da eficiência catalítica. Conforme indicado por Valle, Guimarães e Sampaio (2004) e Monteiro (2018),

¹⁴ SAEED, L. *et al.* **Slow pyrolysis of different PVC types in a bubbling fluidized bed: stabilizer effects.** *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 72, n. 1, p. 63– 74, 2004.

Saiote (2012) também cita que o catalisador é adicionado ao processo de pirólise de forma a aumentar a eficiência do processo.

De acordo com Silva (2014), os catalisadores utilizados em processos pirolíticos se dividem em dois grupos:

- Catalisadores primários: inseridos diretamente ao processo por meio de impregnação ou mistura física, onde a mistura é pirolisada nas mesmas condições;
- Catalisadores secundários: adicionados em um reator isolado, o qual recebe os vapores provenientes da pirólise, podendo operar em diferentes temperaturas.

Na pirólise catalítica os polímeros são degradados diretamente sem nenhum tratamento preliminar, ou então passam por algum craqueamento térmico anterior onde ocorre a remoção de produtos indesejáveis, como por exemplo o cloro presente no PVC ou os aditivos presentes nas misturas. (MONTEIRO, 2018). Segundo Afonso (2013), o craqueamento catalítico visa converter e valorizar hidrocarbonetos de cadeia longa em hidrocarbonetos mais leves, para a produção de combustíveis. A pirólise catalítica resulta em uma ampla gama de mistura de componentes, a maioria deles com alto valor agregado (JUNIOR, 2017).

De acordo com Rebelo (2009) e Afonso (2013) a degradação catalítica de hidrocarbonetos ocorre através da formação de carbocátions, os quais funcionam como intermediários reacionais, reagindo com catalisadores que possuem acidez de Bronsted (doadores de prótons) ou acidez de Lewis (receptores de elétrons).

A seguir, será retratada de maneira simplificada a degradação catalítica de polímeros como, polietileno, poliestireno, polipropileno.

6.6.1 Polietileno

De acordo com Costa (2006), os catalisadores utilizados com maior frequência na pirólise catalítica do polietileno são zeólitos, sólidos com PH ácido e sílica-alumina, porém durante sua pesquisa na literatura, encontrou catalisadores como o FCC (Fluid Catalytic Cracking – Catalisadores de Cracking Catalítico).

Valle, Guimarães e Sampaio (2004) estudaram a pirólise do PEAD e PEBD empregando o catalisador FCC e um catalisador zeolítico (ADZ3) sintético, utilizando técnicas de termogravimetria (TG-DTG). A reação ocorreu em um equipamento TG-DTG, modelo SDT 2860 da marca TA Instruments, sob vazão de nitrogênio de 100 ml/min a uma faixa de temperatura de 30 a 800°C. A degradação catalítica utilizando ADZ3 ocorreu em mais de um estágio para os polietilenos PEAD e PEBD. A degradação catalítica utilizando o FCC ocorreu

em um único estágio para o PEBD e em mais de um estágio para o PEAD. Observou-se uma maior redução na temperatura inicial de degradação para o PEAD, o que indica uma maior eficiência dos catalisadores neste polímero e uma eficiência menor para o PEBD. O catalisador FCC produziu dois produtos: GLP e gasolina. Enquanto o ADZ3 produziu uma maior quantidade de óleo diesel.

Ribeiro, Junior e Costa (2006) estudaram o craqueamento catalítico de PEAD e PEBD com vaselina (utilizada como solvente), frente a catalisadores FCC (de baixa e alta atividade) visando avaliar as frações de combustíveis, como diesel e gasolina. O estudo foi realizado em uma unidade de teste de microatividade, buscando reproduzir condições utilizadas em uma refinaria. As amostras de FCC foram ativadas por 20 minutos a uma temperatura de 520°C, sob o fluxo de nitrogênio e pressão atmosférica de forma a eliminar a umidade existente. O craqueamento catalítico de PEBD na presença de FCC de alta atividade gerou um maior percentual de gasolina, as frações de diesel foram beneficiadas pela presença de um material inerte, mostrando uma prevalência com relação ao craqueamento térmico. O craqueamento catalítico de PEAD frente à FCC de baixa atividade produziu uma fração maior de gasolina, se mostrando tão eficiente quanto ao material inerte para produção de frações de diesel.

6.6.2 Polipropileno

Os catalisadores mais utilizados no processo de pirólise catalítica do polipropileno foram, zeólitos, sílica-alumina e peneiros moleculares, outros catalisadores também foram utilizados, porém em menor quantidade como o catalisador FCC (COSTA, 2006).

Zhou *et al.*¹⁵(2004 *apud* COSTA, 2006, p. 51) efetuaram a pirólise de PP em um reator descontínuo, utilizando zeólito ZSM-5 modificado, como catalisador. Observaram que na presença deste catalisador houve um aumento no percentual de gases obtidos no processo, um percentual de 12,8% foi obtido na ausência de catalisador, enquanto na presença do ZSM-5 modificado obtiveram 38,2% de gases. Houve uma diminuição de líquidos de 87,2% para 58,8% e de resíduos de 7,9% para 3%.

Lin *et al.*¹⁶(1998 *apud* COSTA, 2006, p.51) estudaram a degradação catalítica do PP em um reator de leito fluidizado, utilizando como catalisadores H-ZMS-5, H-USY, H-

¹⁵ ZHAO, Guo-Ming; WANG, Bo. **Catalytic degradation of low-density polyethylene and polypropylene using modified ZSM-5 zeolites.** Quian Zhou, Li Zheng, Yu-Zhong Wang, Polymer Degradation Stability 84 (2004) 493-497.

¹⁶ LEE, Seung-Yup; YOON, Jik-Hyun; KIM, Jong-Ryeul; PARK, Dae-Won. **Degradation of polystyrene using clinoptilolite catalysts.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 64 (2002), 71-83.

modernite, sílica-alumina e MCM-41. Os resultados obtidos mostraram que na presença dos catalisadores H-ZMS-5, H-USY e H-modernite, beneficiava a formação de hidrocarbonetos mais voláteis, enquanto os demais catalisadores beneficiavam a presença de alcenos, e hidrocarbonetos com uma ampla gama de carbono.

6.6.3 Poliestireno

Lee *et al.* (2002), estudaram a degradação catalítica de PS usando catalisadores ácidos como sílica-alumina, HZSM-5, HY, modernite e clinoptiolite (natural e sintético). Os clinoptiolitos mostraram uma boa atividade catalítica na degradação do PS, com uma alta seletividade para líquidos aromáticos. O aumento do tempo de contato e a acidez dos catalisadores aumentaram a produção de etilbenzeno. Observou-se que a alta temperatura de degradação favoreceu a formação do monômero estireno.

Houshmand, Roozbehani, Badakhshan (2013), efetuaram a degradação catalítica do PS em um reator semibatelada, variando a temperatura em 350, 370, 390 e 410°C, utilizando como catalisador o AIT100s, que mostrou uma excelente seletividade para compostos aromáticos. Observou-se que a adição de catalisador levou a um aumento na conversão de pirólise em uma menor temperatura, aumentando a conversão de 65% a 99%. Durante o processo foi possível obter gases, líquidos e resíduos, onde a baixas temperaturas a quantidade de resíduos foi bem alta.

6.7 Fatores que influenciam a pirólise de resíduos plásticos

Vários são os fatores que influenciam o processo de pirólise, bem como o rendimento e a qualidade dos produtos gerados no processo. A pirólise pode ser influenciada por fatores como, temperatura de reação, taxa de aquecimento, tamanho e tipo de material a ser pirolisado, pressão, tempo de residência no reator, umidade presente nos resíduos, catalisador, tipo de reator, composição química, dentre outros como o tipo de pirólise, dividindo-se em pirólise lenta, rápida ou flash (ASSUMPÇÃO, 2018; BRAS, 2011; SILVEIRA, 2015; VIDAL, 2017).

Dos fatores que possuem influência sobre o processo, a temperatura é o mais significativo, pois, influencia a conversão do polímero e a distribuição dos produtos. Na medida em que a temperatura é elevada, a quantidade de gases é aumentada, gerando carvão sólido como resíduo, chamado também de resíduo carbonoso, devido a reações de formação de coque e de hidrocarbonetos (COSTA, 2006; PARADELA, 2012; VIDAL, 2017).

Quanto ao tamanho do resíduo a ser pirolisado, quanto menor o tamanho da partícula, maior a área superficial. Dessa forma a taxa de aquecimento da partícula será maior promovendo a emissão de vapores condensáveis (SILVEIRA, 2015).

Com relação aos tipos de reatores pirolíticos, estes determinam a qualidade da transferência de calor, mistura, bem como a geração de gases, tempo de residência na fase líquida e liberação de produtos primários (BRAS, 2011). De acordo com Agrado e Serrano¹⁷ (1999 *apud* COSTA, 2006, p. 30) os reatores mais utilizados na decomposição térmica de plásticos são os reatores com agitação, leito fixo, fornos rotativos, reatores de leito fluidizado, reatores de leito circulante e extrusores. Segundo Buekens (2006) a escolha do tipo de reator deve ser feita com base em considerações técnicas, tais como transferência de calor, na forma de lidar com a carga de material a ser pirolisado e com os resíduos gerados.

Visando resumir os fatores que influenciam a pirolise de resíduos plásticos, o QUADRO 5 aborda os parâmetros que afetam a distribuição dos produtos provenientes da pirólise e os seus efeitos.

Quadro 5 - Parâmetros que influenciam a distribuição de produtos da pirólise (Continua)

Parâmetro	Efeito
Composição química	Os produtos primários da pirólise estão diretamente relacionados com a estrutura e composição dos reagentes, e também com o mecanismo da sua decomposição (puramente térmico ou catalítico).
Temperatura de pirólise e velocidade de aquecimento	Temperaturas mais elevadas e maiores velocidades de aquecimento aumentam a quebra das ligações e favorecem a produção de pequenas moléculas.
Tempo de pirólise	Maiores tempos de residência favorecem uma conversão secundária dos produtos primários, produzindo mais resíduo carbonoso, alcatrões, bem como produtos termicamente mais estáveis, diminuindo assim o efeito da estrutura original do polímero.
Pressão de operação	Pressões baixas reduzem a condensação de fragmentos reativos formando mais resíduo carbonoso.

¹⁷ Agrado, J.; Serrano, D. **Feedstock Recycling of Plastic Wastes**. 1999.

(Conclusão)

Parâmetro	Efeito
Presença de gases reativos (oxigênio, ar e hidrogênio)	Gera calor internamente através de oxidações parciais, dilui os produtos e influencia equilíbrios, cinéticas e mecanismos.
Uso de catalisador	O seu uso influencia os mecanismos e a cinética, logo, a distribuição dos produtos.
Aditivos incorporados	Geralmente evaporam ou decompõem-se. Apenas em casos pontuais poderão influenciar a cinética ou o mecanismo da reação.
Fase líquida ou gasosa	A pirólise em fase líquida retarda a liberação dos produtos de reação, favorecendo assim interações posteriores entre eles.

Fonte: Adaptado de PARADELA, 2012.

6.8 Caracterização dos produtos da pirólise

Segundo Muniz (2004), no processo de pirólise, os diferentes componentes do polímero atingem suas temperaturas de decomposição e começam a liberar uma ou mais das seguintes substâncias:

- a) Gases combustíveis como alcanos, alcenos, formaldeído e monóxido de carbono;
- b) Gases não combustíveis, como vapor d'água e dióxido de carbono;
- c) Gases corrosivos como cloreto de hidrogênio e brometo de hidrogênio;
- d) Líquidos, geralmente fragmentos das cadeias poliméricas;
- e) Partículas sólidas como fuligem, fibra de vidro e cargas minerais;
- f) Radicais livres.

O QUADRO 6 retrata os principais produtos obtidos através da pirólise dos resíduos de polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS).

Quadro 6 - Principais produtos obtidos pela degradação térmica de polímeros

Material	Temperatura	Pirólise
Poliétileno	A partir de 200°C (mais acentuada a 240°C)	CO, CO ₂ , hidrocarbonetos alifáticos (metano, insaturados leves) e aromáticos, aldeídos, ácidos graxos voláteis e negro de fumo.
	Hidrocarbonetos alifáticos, saturados e não saturados leves (metano, etileno, butenos), cetonas, aldeídos (formaldeído, acetaldeído, acroleína), ácidos graxos voláteis.	
Polipropileno	A partir de 200°C – 250°C	CO, CO ₂ , hidrocarbonetos alifáticos (metano, insaturados leves) e aromáticos (benzênicos e negro de fumo).
	Hidrocarbonetos alifáticos (principalmente não saturados, etileno, butenos), aldeídos (formaldeído, crotonaldeído, metilacroleína), cetonas (metilcetona), ácidos graxos voláteis.	
Poliestireno	A partir de 250°C	CO, CO ₂ , estireno, hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos (etil benzeno, benzeno e tolueno).
	Estireno e seus oligômeros, hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos (benzeno, etil benzeno, cumeno), aldeídos (benzaldeído).	

Fonte: ABHO, 2013.

6.9 Combustível de pirólise

A pirólise de resíduos plásticos é favorecida devido às elevadas taxas de conversão dos hidrocarbonetos em produtos líquidos, utilizados como combustíveis ou matéria-prima para refinarias (ASSUMPÇÃO et al., 2018). Os plásticos, como derivados do petróleo, possuem um elevado poder calorífico (QUADRO 7), o que os tornam uma excelente fonte de energia (OLIVEIRA, 2012). As misturas de plásticos encontradas nos lixos urbanos possuem um poder calorífico de 9.000 BTUs/Kg, entretanto suas frações específicas possuem um saldo energético positivo de 42.000 BTUs/Kg, já o óleo bruto proveniente do petróleo apresenta um poder calorífico aproximado de 12.000 BTUs/Kg (FORLIN; FARIA, 2002).

Quadro 7- Capacidade calorífica de alguns plásticos e combustíveis

Material	Capacidade Calorífica (MJ/kg)
Polietileno (PE)	43,3 – 46,5
Polipropileno (PP)	46,5
Poliestireno (PS)	51,9
Petróleo	42,3
Gasolina	45,2

Fonte: A autora, adaptado de OLIVEIRA, 2012; FRAGA, 2014.

Cabral (2008), realizou a pirólise de polietileno em um reator sob fluxo de nitrogênio, nas temperaturas de 450, 500 e 550°C respectivamente, obtendo 43%, 58% e 53% de óleo diesel nos líquidos pirolíticos. De acordo com Nicacio (2014), a gasolina proveniente da pirólise é uma mistura de vários hidrocarbonetos aromáticos, bem como oleofinas, parafinas, os quais são similares à gasolina originária das refinarias. Como resultado do processo de produção da gasolina de pirólise forma-se uma mistura complicada de alcenos e alcanos, onde estes podem ser controlados para produzir grandes quantidades de hidrocarbonetos.

Ratnasari, Nahil e Williams (2017) realizaram a pirólise de polietileno de alta densidade em dois estágios (no primeiro estágio ocorre a pirólise térmica, no segundo a pirólise catalítica), utilizando catalisadores na proporção de 1:1, com o objetivo de produzir hidrocarbonetos semelhantes a gasolina (C8 a C12). Os resultados foram satisfatórios, obtendo uma fração líquida de 83,15%, sendo 97,72% na faixa da gasolina. Segundo Monteiro (2018), a degradação térmica procedida da degradação catalítica favorece a obtenção de um óleo de elevada qualidade, semelhante a gasolina.

Muniz (2004) realizou um estudo de viabilidade econômica de uma planta de pirólise de resíduos plásticos (Acrilonitrila-Butadieno-Estireno (ABS), polipropileno (PP)) onde chegou à conclusão de que o processo é economicamente viável para produção de combustível. O processo além de economicamente viável é energeticamente autossustentável, e possui a maior parte da receita gerada pela produção de combustível. Ainda de acordo com Muniz (2004), o combustível gerado através da pirólise de ABS e de PP é considerado pela Agência Nacional de Petróleo como combustível tipo E, podendo ser vendido para o abastecimento de sistemas geradores de vapor.

No Brasil, a legislação vigente para atividades de revenda e comércio varejista de combustíveis é a resolução ANP nº 41 de 2013. A resolução dispõe sobre os requisitos necessários para o exercício da atividade de revenda e distribuição de combustíveis

automotivos, bem como revenda varejista exclusiva de GNV (Gás Natural Veicular), que de acordo com Melo (2017), é constituído por hidrocarbonetos como etano e metano.

6.10 Contribuições do processo

Do ponto de vista energético a pirólise é considerada um processo autossuficiente, pois, os gases produzidos durante o processo são reaproveitados no sistema como fonte de calor, além de permitir que diversos tipos de plásticos sejam utilizados como matérias-primas do processo. Vários autores consideram a pirólise como método ideal para a preservação das reservas de combustíveis fósseis e redução do descarte de recursos não degradáveis no meio ambiente (ASSUMPCÃO *et al.*, 2018).

A pirólise é considerada como uma alternativa realista e promissora à valorização de resíduos poliméricos, frente à produção exponencial de plásticos. Tendo em vista que os métodos convencionais de tratamento e disposição final de resíduos plásticos pós-consumo tornam-se cada vez mais irreversíveis com o passar do tempo (AIRES *et al.*, 2003; SOUZA, 2009).

De acordo com Walendziewski¹⁸ (2002 *apud* FIGUEIREDO, 2015, p. 1151) a pirólise de polímeros é aceita no âmbito ambiental e econômico, gerando uma mistura de hidrocarbonetos líquidos, a qual pode ou não ser usada na indústria petroquímica ou na produção de novos plásticos. Diante disto Walendziewski conclui que, a pirólise agrega valor aos resíduos poliméricos, tendo em vista que os produtos gerados a partir do processo poderão ser utilizados como combustíveis ou reinseridos como matéria-prima na indústria, contribuindo assim para vida útil de aterros sanitários. Nesse sentido, Rashid e Sarker (2013) afirmam que a pirólise de resíduos plásticos é um dos melhores métodos para a preservação dos recursos valiosos do petróleo, além de favorecer o meio ambiente, limitando o volume de resíduos plásticos descartados.

De acordo com Sheirs *et al.* (2006), Al-Salem *et al.* (2006) e Buekens¹⁹ (2006 *apud* MONTEIRO, 2018, p. 25) as principais vantagens do processo consistem em:

- Permitir a reciclagem de misturas de resíduos plásticos que não podem ser eficientemente recicladas por meios alternativos;
- Permitir a reciclagem de plásticos sujos, contaminados e não lavados;

¹⁸ Walendziewski, J. **Engine fuel derived from waste plastics by thermal treatment**. Fuel 2002, 81, 473.

¹⁹ Al-Salem, S.M., Lettieri, P. e Baeyens, J. 2009. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. Waste Management. 2009, pp. 2625 – 2643.

- Permitir a reciclagem de plásticos laminados, resultantes de embalagens multicamadas que são difíceis de reciclar usando técnicas tradicionais.

Em 2006, o programa WRAP (Waste and Resources Action Programme) realizou um estudo, o qual foi revisado em 2010, onde avaliou os impactos ambientais dos métodos de destinos dos resíduos sólidos. Escolheu-se as seguintes categorias como critérios de avaliação para os impactos ambientais: esgotamento dos recursos naturais, mudanças climáticas demanda acumulada de energia e consumo de água. Dentre os métodos de destinação dos resíduos sólidos, foi avaliado a pirólise, bem como a destinação do polietileno (PE) (incluindo PEAD e PEBD), poli (tereftalato de etileno) (PET), polipropileno (PP), poliestireno (PS) e policloreto de vinila (PVC) (WRAP, 2010). Ao avaliar a pirólise de PE e PP, com relação à reciclagem de matérias-primas e produção de diesel, os resultados apontaram a pirólise como melhor alternativa para a demanda de energia, pois utiliza do próprio calor gerado no processo. Com relação ao consumo de água da pirólise em uma mistura de PE e PET, este é menor que em outros métodos de destinação de resíduos. Quanto ao esgotamento de recursos, a pirólise se mostra como uma alternativa eficiente, pois permite a conservação de recursos fósseis, bem como o petróleo.

De acordo com Lima *et al.* (2016), o processo de pirólise é eficiente no tratamento de resíduos plásticos, pois em alguns casos é capaz de reduzir o volume de resíduos em até 99% do volume gerado. Segundo Machinery (2017), o processo de pirólise apresenta vantagens como redução da poluição do meio ambiente, redução de resíduos plásticos através da transformação em combustíveis e produtos químicos. Santos (2018), considera a pirólise como um processo vantajoso, pois permite um grau relativamente elevado de contaminantes nos resíduos plásticos a serem reciclados. O processo também admite a reciclagem de plásticos ou compósitos que não possam ser eficientemente reciclados por outros processos.

Além de reduzir o volume de plásticos destinados aos aterros e lixões, a pirólise é utilizada para geração de energia, devido ao elevado poder calorífico dos plásticos, que são derivados do petróleo. Mesmo que o processo consuma muita energia, o seu balanço energético será sempre positivo, pois produz mais do que consome, o que torna o processo autossustentável do ponto de vista energético (AIRES *et al.*, 2003; CAIRES, 2009; PENSAMENTO VERDE, 2013).

A pirólise de resíduos plásticos é capaz de impedir a liberação de substâncias nocivas na atmosfera e diminuir a emissão de poluentes como o metano e o gás carbônico, representando uma alternativa aos aterros sanitários e a incineração de lixo (PENSAMENTO VERDE, 2013).

Segundo Cabral (2008), o processo de pirólise possui emissões atmosféricas dentro dos padrões estabelecidos pela legislação ambiental, com produção de dioxinas e furanos minimizadas.

De acordo com a Resolução nº 316 de 29/10/2002 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), em seu Art. 38, todo e qualquer sistema de tratamento térmico de resíduos não dever ultrapassar os limites máximos de poluentes atmosféricos, onde o limite para as dioxinas e furanos é de 0,50 ng/Nm³. As dioxinas e furanos são compostos orgânicos, que abrangem cloro, oxigênio, hidrogênio e carbono, os quais são considerados nocivos à saúde humana.

De acordo com Figueiredo (2015), a pirólise é um método ambientalmente viável para a reciclagem de plásticos, visto que os produtos obtidos no processo podem ser utilizados como combustíveis, ou matéria-prima para a indústria petroquímica. Devido a eficiência energética do processo, a pirólise vem ganhando força na geração de combustíveis em diversos países.

6.11 Impactos do processo

Mesmo sendo um processo com menor índice de poluentes, a pirólise apresenta frações líquidas, gasosas e sólidas não isentas de contaminantes (SILVEIRA, 2015). De acordo com Miskolczi, Ates e Borsodi (2013), a pirólise de plástico libera radicais de cloro e bromo que ao reagirem com o hidrogênio proveniente do processo, formam ácidos clorídricos e bromídricos (HCl e HBr). A fase líquida contempla contaminantes como cálcio, zinco e antimônio, os quais são oriundos dos aditivos do plástico, e também cromo, ferro e chumbo, provenientes de têxteis, tintas de papeis e até mesmo de fertilizantes de solo.

A pirólise produz gases nocivos ao meio ambiente, os quais necessitam de um tratamento específico antes de serem descartados no meio ambiente. Os rejeitos do processo, possuem um potencial poluidor, tornando-se necessário o descarte dos mesmos de forma adequada (FANECA, 2018).

Monteiro (2018) avaliou a pirólise térmica e catalítica de HPIS (Poliestireno de alto impacto), com base nas categorias: depleção abiótica, acidificação, toxicidade humana, ecotoxicidade (terrestre e água doce), depleção da camada de ozônio, oxidação fotoquímica e eutroficação, aquecimento global. Observou-se que a pirólise catalítica do HPIS resultou em um maior impacto ambiental em praticamente todas as categorias, com exceção das categorias de depleção abiótica, ecotoxicidade terrestre, toxicidade humana, transformação da terra e ocupação do solo. A adição de catalisador ao processo, não se mostra benéfica. O catalisador

altera os produtos provenientes da pirólise, resultando em uma redução de estireno e um aumento do conteúdo de tolueno e benzeno, os quais são considerados produtos insatisfatórios do ponto de vista ambiental. A pirólise catalítica possui influência no aquecimento global, contribuindo com a emissão de CO₂, representando 83,1% das emissões equivalentes, e CH₄, representando 16,4% das emissões. A produção do monômero estireno está associada a este efeito na maioria das vezes, onde a produção do mesmo resultou em emissões potenciais de 1,26 kg de CO₂, o que equivale a 33,6% do total para a categoria no aquecimento global.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos relacionados à viabilidade ambiental do processo de pirólise de resíduos plásticos são escassos. Entretanto os resultados da revisão bibliográfica realizada durante este trabalho permitiram avaliar a viabilidade ambiental deste processo.

A pirólise de resíduos plásticos é um método eficaz na redução de plásticos descartados incorretamente em aterros, lixões e no meio ambiente, reduzindo em até 90% o volume destes resíduos e contribuindo para o reaproveitamento dos mesmos como matéria-prima para diversos segmentos industriais. Porém, como em todo processo de degradação térmica existe a liberação de gases, nocivos ao meio ambiente e a saúde humana. Observou-se que a pirólise catalítica possui aspectos poluentes, o que contribui com o aquecimento global, devido às emissões de dióxido de carbono.

No entanto, as emissões atmosféricas provenientes do processo, bem como as emissões de dioxinas e furanos, estão de acordo com os parâmetros estabelecidos pela Resolução nº 316 de 29/10/2002, Art. n ° 38 do CONAMA.

Conclui-se que a pirólise contribui de forma efetiva com a preservação da vida útil dos aterros sanitários, tornando-se uma excelente técnica de disposição final dos resíduos plásticos, atribuindo valor agregado ao que antes seria descartado incorretamente, transformando-os em combustíveis, e fonte de matéria-prima pra diversos segmentos industriais, além de ser considerada um processo energeticamente autossustentável, pois produz mais energia do que consome.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDI – Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial. **Relatório de Acompanhamento Setorial: transformados plásticos**. 2008. Disponível em: http://www.eco.unicamp.br/neit/images/stories/arquivos/RelatorioABDI/transformados-plasticos_vol-I_dezembro2007.pdf. Acesso em: 16 mai. 2019.

ABIPLAST – Associação Brasileira da Indústria do Plástico. **Nota sobre o relatório solucionar a poluição plástica WWF**. 2019. Disponível em: <http://www.abiplast.org.br/noticias/nota-sobre-o-relatorio-solucionar-a-poluicao-plastica-wwf/>. Acesso em: 15 mai. 2019.

ABIPLAST – Associação Brasileira da Indústria do Plástico. **Perfil indústria brasileira de transformação de material plástico**. 2014. Disponível em: http://file.abiplast.org.br/download/links/2015/perfil_abiplast_2014_web.pdf. Acesso em: 12 mar. 2019.

ABIPLAST – Associação Brasileira da Indústria do Plástico. **Perfil indústria brasileira de transformação de material plástico**. 2016. Disponível em: http://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2019/03/Perfil_2016_Abiplast_web.pdf. Acesso em: 20 mar. 2019.

ABIPLAST – Associação Brasileira da Indústria do Plástico. **Perfil indústria brasileira de transformação e reciclagem do material plástico**. 2017. Disponível em: <http://file.abiplast.org.br/file/download/2018/perfil-2017.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2019.

ABIPLAST – Associação Brasileira da Indústria do Plástico. **Preview perfil indústria brasileira de transformação de material plástico**. 2019. Disponível em: http://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2019/04/preview_perfil_2018_web.pdf. Acesso em: 21 mai. 2019.

ABIPLAST – Associação Brasileira da Indústria do Plástico. **Produção de plástico cresce 2,5% em 2017 e supera expectativas**. 2018. Disponível em: <http://www.abiplast.org.br/sala-de-imprensa/producao-de-plastico-cresce-25-em-2017-e-supera-expectativas/>. Acesso em: 17 mai. 2019.

AFONSO, Denise Cristina Bisca Rodrigues Santo. **Pirólise Térmica e Catalítica de Resíduos Plásticos**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química e Bioquímica) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013. Disponível em: https://run.unl.pt/bitstream/10362/10712/1/Afonso_2013.pdf. Acesso em: 15 jul. 2019.

AIRES, Raquel Dias et al. **Pirólise**. 2003. Disponível em: <http://observatorioambiental.iff.edu.br/publicacoes/publicacoes-cientificas/pirolise.pdf>. Acesso em: 02 set. 2019.

ANDRADE, Cristina Tristão; COUTINHO, Fernanda Margarida Barbosa; DIAS, Marcos Lopes; LUCAS, Elizabete Fernandes; OLIVEIRA, Clara Marize Firemand; TABAK, David. **Dicionário de polímeros**. 1 ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2001.

ANDRADY, Anthony L.; NEAL, Mike. A. Applications and Societal Benefits of Plastics. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, v. 364, p. 1977-1984, 2009. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rstb.2008.0304>. Acesso em: 01 mar. 2019.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Etanol**. 2016. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/biocombustiveis/etanol>. Acesso em: 6 jun. 2019.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Óleo Diesel**. 2016. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/petroleo-derivados/155-combustiveis/1857-oleo-diesel>. Acesso em: 16 jun. 2019.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **RANP 41-2013**. 2013. Disponível em: <http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2013/novembro&item=ranp-41-2013>. Acesso em: 28 set. 2019.

ANTUNES, Adelaide Maria de Souza. **Setores da Indústria Química Orgânica**. Rio de Janeiro: E-papers, 2007. *E-book*. Disponível em: https://books.google.com.br/books/about/Setores_da_Ind%C3%BAstria_Qu%C3%ADmica_Org%C3%A2nica.html?id=FzONfhlqjMIC&printsec=frontcover&source=kp_read_button&edir_esc=y#v=onepage&q&f=false. Acesso em: 22 abr. 2019.

ASSUMPCÃO, Luiz C. F. N. de et al. Avaliação dos Impactos da Pirólise Catalítica de Resíduos Plásticos Pós-Consumo. **Revista Processos Químicos**, [S. l.], v. 12, n. 24, p.25-36, 2 jul. 2018. *Revistas Processos Químicos*. Disponível em: http://ojs.rpqsena.org.br/index.php/rpq_n1/article/view/460. Acesso em: 04 set. 2019.

BARBOSA, Luiz Antonio et al. Polietileno de baixa densidade - PEBD: Mercado, produção, principais propriedades e aplicações. **Espacios**, [s.l.], v. 38, n. 17, p.10-22, 20 nov. 2016. Disponível em: <http://www.revistaespacios.com/a17v38n17/17381710.html>. Acesso em: 23 mar. 2019.

BOEHM, Camila. **Brasil perde R\$ 5,7 bilhões por ano ao não reciclar resíduos plásticos**. Agência Brasil, São Paulo, 7 jun. 2018. Disponível em: <http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2018-06/brasil-perde-r-57-bilhoes-por-ano-ao-nao-reciclar-residuos-plasticos>. Acesso em: 21 abr. 2019.

BORRELY, Daniel Fernandes. **Estudo Comparativo da degradação de poliestireno e de poliestireno de alto impacto por envelhecimentos natural e artificial**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. Disponível em: <file:///C:/Users/Usu%C3%A1rio/Downloads/PSwomDan.pdf>. Acesso em: 03 ago. 2019.

BRÁS, Daniela Martins. **Estudo da Pirólise de Resíduos Plásticos Provenientes do Abate de Automóveis**. 2011. Dissertação (Mestrado em Energia e Bioenergia) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011. Disponível em: https://run.unl.pt/bitstream/10362/6888/1/Bras_2011.pdf. Acesso em: 16 jul. 2019.

BRASIL. **Lei 9.974**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 5 jan. 2007. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9974.htm. Acesso em: 14 mai. 2019.

BRASIL. **Lei 11.445**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 5 jan. 2007. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/L11445compilado.htm. Acesso em: 14 mai. 2019.

BRASIL. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**, Lei 12.305. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2 ago. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/Decreto/D7404.htm. Acesso em: 14 mai. 2019.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 316, de 29 de outubro de 2002**. 2002. Diário Oficial da União. Disponível em: http://www.progere.ufc.br/wp-content/uploads/2015/08/CONAMA-316_02-tratamento-t%C3%A9mico-de-res%C3%ADduos.pdf. Acesso em: 14 mai. 2019.

BRASIL, Amcham. **Plástico é o maior desafio ambiental do século XXI, segundo ONU Meio Ambiente**. 2018. Disponível em: <https://economia.estadao.com.br/blogs/ecoando/plastico-e-o-maior-desafio-ambiental-do-seculo-xxi-segundo-onu-meio-ambiente/>. Acesso em 20 mar. 2019.

BUEKENS, A. G. Introduction to Feedstock Recycling of Plastics. *In*: SCHEIRS, John; KAMINSKY, Walter. **Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics: Converting Waste Plastics into Diesel and Other Fuels**. [S. l.]: John Wiley Sons Ltd, 2006. Cap. 1. p. 3-41. *E-book*. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/0470021543>. Acesso em: 13 ago. 2019.

CABRAL, Lucianna Lopes. **Pirólise de resíduos plásticos da plataforma da Baía de Campos**. 2008. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química Ambiental, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <http://livros01.livrosgratis.com.br/cp108277.pdf>. Acesso em: 03 set. 2019.

CAIRES, Luiza. **Técnica reduz emissão de poluente no uso de plástico como combustível**. 2009. Disponível em: <https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=emissao-de-poluente-uso-de-plastico-como-combustivel&id=010125090211#.XZpfgv1KjIV>. Acesso em: 02 set. 2019.

CÂNDIDO, Carla Valéria Lima *et al.* **Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos Plásticos**. Belo Horizonte, nov. 2018. Disponível em: http://www.projetoreciclar.ufv.br/docs/cartilha/pgi_plasticos.pdf. Acesso em: 19 abr. 2019.

CANEVAROLO JR, Sebastião Vicente. **Ciência dos polímeros: um texto base para tecnólogos e engenheiros**. 3ª ed. rev. e ampl. São Paulo: Artliber Editora, 2013. *E-book*. Disponível em: http://www.ifba.edu.br/professores/iarasantos/QUI%20541_Qu%C3%ADmica%20de%20pol%C3%ADmeros/Livros/Cie%CC%82ncia%20dos%20polimeros%20-%20Canevarolo%20Jr.,%20Sebastia%CC%83o%20V..pdf. Acesso em: 12 jun. 2019.

CASTRO, Alexandra Manuela Neves de. **Mecanismos de Decomposição Pirolítica de Resíduos com PVC com vista à sua valorização.** 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Minho Escola de Engenharia, [S. l.], 2013. Disponível em: https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/25621/1/PhD_AC_2013.pdf. Acesso em: 06 ago. 2019.

CERRI, Alberto. **Prós e contras do plástico pro meio ambiente.** 2011. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/component/content/article/35/686-pros-e-contras-do-plastico-para-o-meio-ambiente.html>. Acesso em: 15 jun. 2019.

CINELLI, Bernardo Alves. **Produção de etanol a partir da fermentação simultânea à hidrólise do amido granular de resíduo agroindustrial.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

CNQ – Confederação Nacional do Ramo Químico. **Produção de plástico no Brasil deverá subir 2,5% neste ano.** 2019. Disponível em: <http://cnq.org.br/noticias/producao-de-plastico-no-brasil-devera-subir-2-5-neste-ano-6a98/>. Acesso em: 17 mai. 2019.

COLABUONO, Fernanda Imperatrice. **Poluição por plásticos nos oceanos: uma preocupação global.** 2010. Disponível em: <http://www.globalgarbage.org/blog/index.php/2010/06/26/poluicao-por-plasticos-nos-oceanos-uma-preocupacao-global/>. Acesso em: 18 ago. 19.

COSTA, Carlos Roberto de Souza; DUARTE, Neimar Freitas; LEMOS, Carlos Fernando. **Estudo comparativo da Lei 12.305/10 com as leis de resíduos sólidos da República Federal da Alemanha, e dos Estados Unidos da América.** 2015. Disponível em: <https://www.bambui.ifmg.edu.br/portal/images/SEP/2015/09.pdf>. Acesso em: 24 mai. 2019.

COSTA, Paula Alexandra da Conceição. **Produção de hidrocarbonetos líquidos e gasosos por pirólise de resíduos plásticos.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2006. Disponível em: <http://repositorio.ineg.pt/handle/10400.9/415>. Acesso em: 12 mar. 2019.

CRAIG FREUDENRICH, Ph. D. **Como funciona a refinação de petróleo.** 2001. Disponível em: <https://science.howstuffworks.com/environmental/energy/oil-refining.htm>. Acesso em: 24 mai. 2019.

DIAS, Marina Oliveira de Souza. **Simulação do processo de produção de etanol a partir do açúcar e do bagaço, visando a integração do processo e a maximização da produção de energia e excedentes do bagaço.** 2008. 253 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/266223>. Acesso em: 11 jun. 2019.

DIRETIVA 96/61/CE do Parlamento Europeu e do Conselho relativa à prevenção e controle integrados da poluição, 24 de Setembro de 1996. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:01996L0061-20060224&from=RO>. Acesso em: 01 jun. 2019.

EPA – United States Environmental. **Protection Agency. What is the Solid Waste Disposal Act of 1965.** 2018. Disponível em: <https://waste.zendesk.com/hc/en-us/articles/211677218-What-is-the-Solid-Waste-Disposal-Act-of-1965->. Acesso em: 01 jun. 2019.

EUR-Lex. **Embalagens e resíduos de embalagens**, 2018. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=LEGISSUM%3A121207>. Acesso em: 22 mai. 2019.

FANECA, Andréa Silva. **Análise da viabilidade ambiental do aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos para a geração de eletricidade a partir da pirólise:** estudo de caso de consórcio intermunicipal do sul de Minas Gerais. 2018. 74 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2018. Disponível em: <https://saturno.unifei.edu.br/bim/201800292.pdf>. Acesso em: 05 set. 2019.

FERREIRA, Sérgio L. et al. Análise por cromatografia gasosa de BTEX nas emissões de motor de combustão interna alimentado com diesel e mistura diesel-biodiesel (B10). **Química Nova**, [s.l.], v. 31, n. 3, p.539-545, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422008000300015>. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422008000300015. Acesso em: 11 jun. 19.

FERREIRA, Artur. **Como ocorre o refino do petróleo?**. 2018. Disponível em: <https://www.minasjr.com.br/como-ocorre-o-refino-do-petroleo/>. Acesso em: 21 mai. 2019.

FIGUEIREDO, A. L.; ALVES, A. P. M.; JUNIOR, V.J. Fernandes; ARAUJO, A. S. **Reciclagem terciária do poli(etileno tereftalato) visando a obtenção de produtos químicos e combustível:** uma revisão. Revista virtual de química. [S. l.], v. 7, n. 4, jan. 2015. Disponível em: <http://rvq.sbq.org.br/imagebank/pdf/v7n4a08.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2019.

FIGUEIREDO, Erica Airosa. **Refinaria de petróleo.** 2017. Disponível em: <https://www.infoescola.com/quimica/refinaria-de-petroleo/>. Acesso em: 11 jun. 2019.

FLUMIGNAN, Danilo Luiz. **Caracterização da qualidade e interpretação das propriedades físico-químicas de gasolinas C brasileiras através de cromatografia gasosa e métodos quimiométricos.** 2005. 141 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2005. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/97992/flumignan_dl_me_araiq.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 06 jun. 2019.

FORLIN, Flávio J.; FARIA, José de Assis F. Considerações Sobre a Reciclagem de Embalagens Plásticas. **Polímeros**, [s.l.], v. 12, n. 1, p.1-10, 2002. <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-14282002000100006>. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-14282002000100006&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 22 set. 2019.

FRAGA, Simone Carvalho Levorato. **Reciclagem de matérias plásticas:** aspectos técnicos, Econômicos, Ambientais e Social. 1 ed. São Paulo: Érica, 2014. 120 p. *E-book*.

FREUDENRICH, Craig C. **Como funciona o refino de petróleo.** 2001. Disponível em: <https://pt.scribd.com/doc/25486024/Como-funciona-a-perfuracao-de-petroleo>. Acesso em: 12 ago. 19.

GAUTO, Marcelo. (org.). **Petróleo e gás**. Porto Alegre: Bookman, 2016. *E-book*.

GOMES, Gecimar Oliveira. **A abordagem no ensino de química sobre a combustão dos polímeros e a questão ambiental**, 2013. 40 f. TCC (Graduação em Ensino de Química) - Instituto de Química, Universidade de Brasília, Brasília, 2013. Disponível em: http://bdm.unb.br/bitstream/10483/7451/2/2013_GecimarOliveiraGomes.pdf. Acesso em: 01 out. 2019.

GONÇALVES, Cecília Korber. **Pirólise e Combustão de resíduos plásticos**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-09012008-122306/publico/dissertacao_Cecilia_K_Goncalves.pdf. Acesso em: 29 jul. 2019.

GORNI, Antonio Augusto. **A Evolução dos Materiais Poliméricos ao Longo do Tempo**. 2003. Disponível em: http://www.gorni.eng.br/hist_pol.html. Acesso em: 27 fev. 2019.

GORNI, Antonio Augusto. **Introdução aos plásticos**. 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Antonio_Gorni/publication/266178341_INTRODUCAO_AOS_PLASTICOS/links/54b435190cf28ebe92e463c0.pdf. Acesso em: 17 jun. 2019.

GOUVERNAMENT OF CANADA. **Industry Profile for the Canadian plastic products industry**. 2017. Disponível em: <https://www.ic.gc.ca/eic/site/plastics-plastiques.nsf/eng/pl01383.html>. Acesso em: 24 mai. 2019.

GOUVEIA, Nelson. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. **Ciência e Saúde Coletiva**, São Paulo, v. 17, n. 6, p. 1503 – 1510 jun. 2012. Disponível em: <https://scielosp.org/pdf/csc/2012.v17n6/1503-1510/pt>. Acesso em 20 abr. 2019.

HAMID, S. Halim. **Handbook of Polymer Degradation: Second Edition, Revised and Expandend**. [S. l.]. Taylor & Francis, 2000. *E-book*. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=ptBR&lr=&id=2URZDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ots=edawI0Igb6&sig=weMJgiHA-OMRYANTOZZSOI45GRY#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 03 ago. 2019.

HENRIQUES, André Jorge Agostinho. **Produção de Combustíveis Líquidos por Pirólise de Misturas de Resíduos Plásticos e Óleos Vegetais**, 2012. 75 f. Dissertação (Mestrado em Energia e Bioenergia) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012. Disponível em: https://run.unl.pt/bitstream/10362/9086/1/Henriques_2012.pdf. Acesso em: 22 set. 2019.

HESS, Sônia Corina. **Os plásticos podem ser perigosos?**. 2012. Disponível em: <http://cienciahoje.org.br/artigo/os-plasticos-podem-ser-perigosos/>. Acesso em: 03 ago. 2019.

HOUSHMAND, D.; ROOZBEHANI, B.; BADAKHSHAN, A. **Thermal and Catalytic Degradation of Polystyrene with a Novel Catalyst**. 2013. Disponível em: <https://ojs.excelingtech.co.uk/index.php/IJSET/article/download/639/402>. Acesso em 12 ago. 2019.

JORNAL OFICIAL DAS COMUNIDADES EUROPEIAS. **Diretiva 94/62/CE**, 1999.

Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:1999:056:0047:0048:PT:PDF>. Acesso em: 22 mai. 2019.

JUNIOR, Humberto Arimatéia. **Pirólise de misturas plásticas**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <http://portal.peq.coppe.ufrj.br/index.php/producao-academica/dissertacoes-de-mestrado/2017/488--64/file>. Acesso em: 28 jul. 2019.

JURAS, Ilidia da Ascensão Garrido Martins. **Legislação sobre resíduos sólidos: Comparação da lei 12.305/10 com a legislação de países desenvolvidos**. 2012. Disponível em: <http://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/estudos-e-notas-tecnicas/areas-da-conle/tema14/2012_1658.pdf>. Acesso em: 30 ago. 19.

KAMINSKY, W.; PREDEL, M.; SADIKI, A. **Feedstock recycling of polymers by pyrolysis in a fluidised bed**. 2004. Disponível em: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-e037ab02-83f-385-accd-97d5e29e5392>. Acesso em: 04 ago. 2019.

KANTOVISCKI, Adriano. **Materiais Poliméricos: Módulo 2 - Processos de Transformação de Polímeros**. 2011. Disponível em: <http://www.damec.ct.utfpr.edu.br/automotiva/downloadsAutomot/d6matPolimMod2.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2019.

KUMAR, Sachin; SINGH, R.K. **Recovery of Hydrocarbon Liquid From Waste High Density Polyethylene by Thermal Pyrolysis**. Brazilian of Chemical Engineering, [S. l.] v. 28, n. 4, dez. 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/bjce/v28n4/a11v28n4.pdf>. Acesso em: 04 ago. 2019.

KUMAR, Sachin; SINGH, R. K. **Thermolysis of High-Density Polyethhylene to Petroleum Products**. 2013. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/jpe/2013/987568/>. Acesso em: 04 ago. 2019.

LIMA, Fabiano A. et al. **O estudo do processo de pirólise**. Disponível em: <https://www.webartigos.com/storage/app/uploads/public/588/508/2c4/5885082c4c251967137333.pdf>. Acesso em: 22 set. 2019.

LIMA, Gabriel. **Destilação atmosférica**. 2013. Disponível em: <https://prezi.com/ixnseozo2hab/destilacao-atmosferica/>. Acesso em: 24 mai. 2019.

LIMA, Luiz Mário de Queiroz. **Lixo Tratamento e Biorremediação**. 3 ed. ver. e ampliada. [S.l.]: Hemus, 2004.

LIMA, Samuel. **Gasolina: conheça o processo para a fabricação com combustível**. 2018. Disponível em: <https://revistagalileu.globo.com/Revista/noticia/2018/03/gasolina-conheca-o-processo-para-fabricacao-do-combustivel.html>. Acesso em: 24 mai. 2019.

LIMA, Urgel de Almeida; AQUARONE, Eugênio; WALTER, Borzani; WILLIBALDO, Schmidell. **Biotecnologia industrial**. Vol. 3. São Paulo: Blucher, 2001.

LEE, Seung-Yup; YOON, Jik-Hyun. KIM, Jong-Ryeul; PARK, Dae-Won. **Degradation of polystyrene using clinoptilolite catalysts**. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 64, n. 1, July 2002, p. 71-83. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237001001711>. Acesso em: 10 ago. 2019.

LONTRA, Beatriz Gondim da Fonseca. **Reciclagem mecânica de polietileno de baixa densidade obtido a partir de sacolas plásticas**, 2011. 35 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10003385.pdf>. Acesso em: 05 set. 2019.

MACHADO, Cristina Maria Monteiro; ABREU, Frederique Rosa e. Produção de álcool combustível a partir de carboidratos. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, Df, v. 3, n. 15, p.64-78, Não é um mês valido! 2006. Disponível em: <http://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&id=780616&biblioteca=vazio&busca=780616&qFacets=780616&sort=&paginacao=t&paginaAtual=1>. Acesso em: 06 jun. 19.

MACHADO, Roberta. Combustível feito a partir do plástico. **Correio Braziliense**, Brasília, 12 fev. 2014. Disponível em: https://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/eu-estudante/me_gerais/2014/02/12/me_gerais_interna,412414/combustivel-feito-a-partir-do-plastico.shtml. Acesso em: 23 abr. 2019.

MACHINERY, Henan Realtop. **Máquina de pirólise plástica de sucata Tecnologia de pirólise de plástico residual**. 2017. Disponível em: <http://pt.realtopmachine.com/news/scrap-plastic-pyrolysis-machine-waste-plastic--8113476.html>. Acesso em: 02 set. 2019.

MANO, Eloisa Biasotto; MENDES, Luís Claudio. **Introdução a polímeros**. 2ª ed. rev. e ampl. São Paulo: Blucher, 1999.

MANO, Eloisa Biasotto; BONELLI, Cláudia Maria Chagas. A reciclagem de plásticos pós-consumidos. **Revista de Química Industrial**, São Paulo, ano. 62, n. 698, p.7-10, out/dez. 1994. Disponível em: http://www.abq.org.br/rqi/dl.php?arquivo=edicoes_1999/1994/RQI-698.pdf. Acesso em: 07 jun. 19.

MANO, Eloisa Biasotto; PACHECO, Élen B. A. V.; BONELLI, Cláudia M. C. **Meio Ambiente, Poluição e Reciclagem**. 1 ed. São Paulo: Blucher, 2005. 200 p

MANO, Eloisa Biasotto; PACHECO, Élen B. A. V.; BONELLI, Cláudia M. C. **Meio Ambiente, Poluição e Reciclagem**. 2 ed. São Paulo: Blucher, 2010. 200 p

MARTINS, Silas Sarkiz da Silva et al. Produção de petróleo e impactos ambientais: Algumas Considerações. **Holos**, [s.l.], v. 6, p.54-76, 11 dez. 2015. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN). Disponível em: <http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/2201/1212>. Acesso em: 12 mar. 2019.

MELO, Edson. **GNV – Gás Natural Veicular: combustível alternativo**. 2017. Disponível em: <https://dallasrentacar.com.br/gnv-gas-natural-veicular-combustivel-alternativo/>. Acesso em: 29 set. 2019.

MESQUITA, João Lara. Reciclagem do plástico: um drama da nossa geração. **Estadão**, São Paulo, 4 maio 2018. Disponível em: <https://marsemfim.com.br/reciclagem-do-plastico/>. Acesso em: 20 abr. 2019.

MILLET, Hervé. **Apesar dos detratores, a indústria do plástico segue de vento em popa**. Folha de São Paulo (Online). Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/mercado/2018/07/apesar-dos-detratores-a-industria-do-plastico-segue-de-vento-em-popa.shtml>. Acesso em: 27 mai. 2019.

MINAS PETRO. **Quais os diferenciais do etanol de segunda geração?** 2016. Disponível em: <http://minaspetro.com.br/blog/2016/12/09/quais-os-diferenciais-do-etanol-de-segunda-geracao/>. Acesso em: 27 ago. 2019.

MISKOLCZI, Norbert; ATES, Funda; BORSODI, Nikolett. Comparison of real waste (MSW and MPW) pyrolysis in batch reactor over different catalysts. Part II: Contaminants, char and pyrolysis oil properties. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 144, p.370-379, set. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.06.109>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852413010389?via%3Dihub>. Acesso em: 05 set. 2019.

MONTEIRO, Alessandra da Rocha Duailibe. **Contribuição da reciclagem química de resíduos plásticos para o desenvolvimento sustentável**. 2018. 328 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <http://portal.peq.coppe.ufrj.br/index.php/producao-academica/teses-de-doutorado/2018-1/533-104/file>. Acesso em: 05 ago. 2019

MORAES, Luana Cristina Rodrigues de et al. Processo de pirólise para decomposição do lixo urbano. **Revista Pesquisa e Ação**, [S. l.], v. 1, n. 1, p.133-140, 2015. Disponível em: <https://revistas.brazcubas.br/index.php/pesquisa/article/download/476/553/>. Acesso em: 02 out. 2019.

MORTIMER, Eduardo Fleury; MACHADO, Andréia Horta. **Química 3**. 1 ed. São Paulo: Scipione, 2010.

MUNIZ, Ana Rosa Costa. **Otimização da operação de um reator de pirólise de resíduos sólidos industriais**. 2004. 197 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/87220/201568.pdf?sequence=1>. Acesso em: 25 set. 2019.

NAJJAR, Abduel Majid K.; ELMELAH Mohamed A.; LTAYEF, Rashid S. R.; ABUDHER, Fahima N. **Systematic Study to Convert Polyvinyl Chloride Waste into Commercial Chemicals**. International Journal of Environmental Science and Development, v. 5, n. 6, dez. 2014. Disponível em: <http://www.ijesd.org/papers/545-CD0180.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2019.

NICÁCIO, Aldenira Silvestre Santana. **Craqueamento do petróleo**, 2014. 70 f. TCC (Graduação em Química) - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2014.

Disponível em: <http://dspace.bc.uepb.edu.br/jspui/bitstream/123456789/5200/1/PDF%20-%20Aldenira%20Silvestre%20Santana%20Nic%C3%A1cio.pdf>. Acesso em: 12 set. 2019.

NUNES, Edilene de Cássia Dutra; LOPES, Fábio Renato Silva. **Polímeros: conceitos, estrutura molecular, classificação e propriedades**. 1ª ed. São Paulo: Editora Érica, 2014.

NUNES, Edilene de Cássia Dutra; SANTOS, Leandro José dos. **Termoplásticos: estruturas, propriedades e aplicações**. 1ª ed. São Paulo: Saraiva, 2015.

OLIVEIRA, Andrea. **Combustíveis: origem, classificação e características**. 2018. Disponível em: <https://www.producaodebiodiesel.com.br/mercado-de-combustiveis/combustiveis-origem-classificacao-e-caracteristicas>. Acesso em: 21 mai. 2019.

OLIVEIRA, Mara L. de et al. Pirólise de resíduos poliméricos gerados por atividades offshore. **Polímeros**, [s.l.], v. 19, n. 4, p.297-304, 2009. FapUNIFESP (SciELO).

<http://dx.doi.org/10.1590/s0104-14282009000400009>. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/po/v19n4/09.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2019.

OLIVEIRA, Maria Clara Brandt Ribeiro de. **Gestão de resíduos plásticos pós-consumo: perspectivas para a reciclagem no Brasil**. 2012. 91 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: http://antigo.ppe.ufrj.br/ppes/production/tesis/maria_deoliveira.pdf. Acesso em: 02 mar. 2019.

O'NEILL, Kate. **The plastic waste crisis is na opportunity for the US to get serious about recycling at home**. 2018. Disponível em: <https://theconversation.com/the-plastic-waste-crisis-is-an-opportunity-for-the-us-to-get-serious-about-recycling-at-home-93254>. Acesso em: 23 mai. 2019.

PARADELA, Filipe Manuel Ramos. **Estudo da pirólise de misturas de resíduos plásticos e de biomassa**. 2007. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2007. Disponível em: <http://repositorio.lneg.pt/bitstream/10400.9/450/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O%20FP.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2019.

PARADELA, Filipe Manuel Ramos. **Estudo da pirólise de mistura de resíduos de plásticos, pneus e biomassa**. 2012. Dissertação (Doutorado em Engenharia Química e Bioquímica) - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012. Disponível em: <https://run.unl.pt/handle/10362/9060>. Acesso em: 06 ago. 2019.

PENSAMENTO VERDE. **Conheça o processo de pirólise do lixo**. 2013. Disponível em: <https://www.pensamentoverde.com.br/reciclagem/conheca-o-processo-de-pirolise-do-lixo/>. Acesso em: 02 set. 2019.

PETROBRAS. **Óleo diesel: combustível utilizado em motores de combustão interna e ignição por compressão**. 2014. Disponível em: <http://www.br.com.br/pc/produtos-e-servicos/para-industrias/oleo-diesel-industria>. Acesso em: 15 jun. 2019.

PETROBRAS. **Refino**, [2019]. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/refino/>. Acesso em: 24 mai. 2019.

PIATTI, Tania Maria; RODRIGUES, Reinaldo Augusto Ferreira. **Plásticos:** características, usos, produção e impactos ambientais. 2005. Disponível em: http://www.usinaciencia.ufal.br/multimedia/livros-digitais-cadernos-tematicos/Plasticos_caracteristicas_usos_producao_e_impactos_ambientais.pdf. Acesso em: 12 mar. 2019.

PINTO, José Carlos et al. **Impactos ambientais causados pelo plástico:** Uma discussão abrangente sobre os mitos e os dados científicos. Rio de Janeiro: E-Papers, 2012. *E-books*. Disponível em: https://books.google.com.br/books/about/Impactos_ambientais_causados_pelos_pl%C3%A1sticos.html?id=oGhqHBWO2cC&printsec=frontcover&source=kp_read_button&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false. Acesso em: 15 abr. 2019.

PÍTSICA, Monique. **Energias renováveis:** o papel da irena. 1 ed. Curitiba: Appris, 2015.

PITT, Fernando Darci; BOING, Denis; BARROS, António André Chivanga. **Desenvolvimento histórico, científico e tecnológico de polímeros sintéticos e de fontes renováveis.** 2011. Disponível em: <https://periodicos.unifebe.edu.br/index.php/revistaeletronicadaunifebe/article/view/47/38>. Acesso em: 03 ago. 2019.

PLASTICS EUROPE, **Plastics - the facts 2016**, An analysis of European plastics production, demand and waste data. Disponível em: <https://www.plasticseurope.org/application/files/4315/1310/4805/plastic-the-fact-2016.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2019.

PLASTICS EUROPE, **Plastics - the facts 2017**, An analysis of European plastics production, demand and waste data. Disponível em: https://www.plasticseurope.org/application/files/5715/1717/4180/Plastics_the_facts_2017_FINAL_for_website_one_page.pdf. Acesso em: 24 mar. 2019.

PORTAL DE ENGENHARIA QUÍMICA. **Esquema da Destilação Fracionada do Petróleo.** 2008. Disponível em: http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?option=com_content&task=view&id=224&I. Acesso em: 30 mai. 2019.

QUEVEDO, Renata Tomaz. **Destilação fracionada.** 2016a. Disponível em: <https://www.infoescola.com/quimica/destilacao-fracionada/>. Acesso em: 24 mai. 2019.

QUEVEDO, Renata Tomaz. **Diesel.** 2016b. Disponível em: <https://www.infoescola.com/quimica/diesel/>. Acesso em: 12 jun. 2019.

RASHID, Mohammad Mamunor; SARKER, Moinuddin. **Waste Polyethylene Teraphthalate (PETE) and Polystyrene (PS) Into Fuel.** 2013. Disponível em: <https://www.ijstr.org/final-print/july2013/Waste-Polyethylene-Terephthalate-Pete-And-Polystyrene-Ps-Into-Fuel.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2019.

RATNASARI, Devy K.; NAHIL, Mohamad A.; WILLIAMS, Paul T. Catalytic pyrolysis of waste plastics using staged catalysis for production of gasoline range hydrocarbon oils. **Journal Of Analytical And Applied Pyrolysis**, [s.l.], v. 124, p.631-637, mar. 2017.

Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2016.12.027>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237016306015>. Acesso em: 25 set. 2019.

REBELO, Patrícia Alexandra da Cunha. **Degradação Catalítica do Polietileno**. 2009. Dissertação (Mestrado em Processamento e Caracterização de Materiais) – Universidade Do Minho Escola de Engenharia, [S. l.], 2009. Disponível em: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/10814/1/tese.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2019.

RIBEIRO, Alessandra M.; JÚNIOR, Hélio F. Machado; COSTA, Dilma A. **Craqueamento catalítico de refinaria** – Produção de frações combustíveis. 2006. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282006000400011. Acesso em: 10 ago. 2019.

RIBEIRO, Amarolina. **Nafta**. 2003. Disponível em: <https://www.infoescola.com/geografia/nafta/>. Acesso em: 19 mai. 2019.

ROCHA, César Augusto; SILVA, Elton de Freitas; SOUZA, Roberta Cristina Carvalho de. **Polímero de entretenimento: Uma macromolécula biodegradável**. 2013. 94 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Bacharel em Química), Centro Universitário Católico Salesiano Auxilium, Lins, 2013. Disponível em: <http://www.unisalesiano.edu.br/biblioteca/monografias/56278.pdf>. Acesso em: 09 mar. 19.

ROYAL FIC. **O caminho do petróleo à gasolina**. 2016. Disponível em: <https://www.royalfic.com.br/o-caminho-do-petroleo-gasolina/>. Acesso em: 24 mai. 2019.

SAIOTE, Ricardo Miguel Louro. **Estudo da pirólise catalítica de resíduos plásticos**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia e do Meio Ambiente) – Universidade Lisboa, [S. l.], 2012. Disponível em: https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/9062/1/ulfc104438_tm_Ricardo_Saiote.pdf. Acesso em 10 ago. 2019.

SANTOS, Vitor Petrucci. **Análise termodinâmica de gás de síntese no processo de combustão em ciclo otto**, 2018. 64 f. TCC (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/21692/1/AnaliseTermodinamicaGas.pdf>. Acesso em: 22 set. 2019.

SHREVE, Randolph Norris; BRINK, Joseph A. Jr. **Indústrias de processos químicos**. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

SILVA, Aianny Sperandio. **Catalisadores a base de estanha sulfatada para tratamento dos vapores de pirólise do bagaço de cana de açúcar**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <http://portal.peq.coppe.ufrj.br/index.php/producao-academica/dissertacoes-de-mestrado/2014-1/284-catalisadores-a-base-de-estranha-sulfatada-para-tratamento-dos-vapores-de-pirolise-do-bagaco-de-cana-de-acucar/file>. Acesso em: 10 ago. 2019.

SILVA, Jonathan. **Como é feito o óleo diesel que conhecemos.** 2015. Disponível em: <http://www.saoleopoldodiesel.com.br/entrega-de-oleo-diesel/como-e-feito-o-oleo-diesel-que-conhecemos/>. Acesso em: 15 jun. 2019.

SILVEIRA, Paula Daolio. **Avaliação do Potencial da Pirólise de Resíduos Sólidos Urbanos Como Processamento Termoquímico Para Recuperação de Matéria e Energia.** 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2015. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/5345/1/LD_COEAM_2015_1_18.pdf. Acesso em: 11 jul. 2019.

SOARES, Vilhena. **Plástico: mundo produziu 8,3 bi de toneladas em 65 anos e reciclou só 9%.** 2017. Disponível em: https://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/ciencia-e-saude/2017/07/22/interna_ciencia_saude,611649/plastico-mundo-produziu-8-3-bi-de-toneladas-em-65-anos-e-reciclou-so.shtml. Acesso em: 19 mai. 2019.

SOUZA, Gustavo Rodrigues. **Avaliação experimental da transferência de calor em fornalha flamotubular utilizando como combustível o biodiesel e o óleo diesel.** 2005. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18135/tde-15022006-155911/pt-br.php>. Acesso em: 21 mai. 2019.

SPINACÉ, Márcia Aparecida da Silva; PAOLI, Marco Aurelio de. A tecnologia da reciclagem de polímeros. **Química Nova**, [s.l.], v. 28, n. 1, p.65-72, fev. 2005. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422005000100014. Acesso em: 20 mar. 19.

TEIXEIRA, Marilane; CIRINO, Cláudia; LINO, Domingos. **A indústria de transformados plásticos.** 1 ed. São Paulo: Sindicato dos Químicos de São Paulo, 2017. *E-book*. Disponível em: <https://quimicosp.org.br/wp-content/uploads/2017/10/livro-a-industria-de-transformados-plasticos.pdf>. Acesso em: 17 mai. 2019.

TOLENTINO, Nathalia Motta de Carvalho. **Processos químicos industriais.** 1 ed. São Paulo: Érica, 2015.

URNS, Stephen R., **Introdução à combustão: conceitos e aplicações.** 3 ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

UEKI, Marcelo Massayoshi; PISANU, Luciano. **Fundamentos do processo de rotomoldagem,** 2007. Disponível em: <http://moldesinjecaoplasticos.com.br/fundamentos-do-processo-de-rotomoldagem/>. Acesso em: 20 ago. 2019.

VALLE, Maria Letícia Murta; GUIMARÃES, Maria José de Oliveira Cavalcanti; SAMPAIO, Cristiane M. S. **Degradação de poliolefinas utilizando catalisadores zeolíticos.** 2004. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282004000100009. Acesso em: 10 ago. 2019.

VASCONCELOS, Yuri. **Planeta Plástico.** 2019. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/2019/07/08/planeta-plastico/>. Acesso em: 26 ago. 2019.

VIANA, Fernando Luiz E. Indústria Petroquímica. **Caderno Setorial Etene**, Fortaleza, v. 3, n. 47, p.1-12, out. 2017. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/documents/80223/4122020/47_petroquimica.pdf/e772fd69-075f-2d8b-51f6-32117bd34acb. Acesso em: 15 ago. 19.

VIDAL, Douglas Bitencourt. **Estudo da influência das condições de pirólise de composto de hidrocarbonetos PEBD/Al na produção de hidrocarbonetos**. 2017. 49 f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Programa de Pós-graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus-ES, 2017. Disponível em: http://portais4.ufes.br/posgrad/teses/tese_11263_61%20-%20Douglas%20Bitencourt%20Vidal.pdf. Acesso em: 18 ago. 2019.

WRAP. **Waste and Resources Action Programe: Environmental benefits of recycling – 2010 update**. 2010. Disponível em: http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/Environmental_benefits_of_recycling_2010_update.3b174d59.8816.pdf. Acesso em: 25 set. 2019.

XAVIER, Lúcia Helena et al. **Legislação ambiental sobre destinação de resíduos sólidos: o caso das embalagens plásticas pós-consumo**. Bauru. p.1-11, 2006. Disponível em: http://www.simpep.feb.unesp.br/anais/anais_13/artigos/689.pdf. Acesso em: 15 mai. 2019.

ZAIONCZ, Soraia. **Estudo do efeito de plastificação interna do PVC quimicamente modificado**. 2004. Dissertação (Mestrado em Química Orgânica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/3513>. Acesso em: 06 ago. 2019.

ZANIN, Maria; MANCINI, Sandro Donnini. **Resíduos plásticos e reciclagem: aspectos gerais e tecnologia**. 2 ed. São Carlos: EdUFSCar, 2015. *E-book*. Disponível em: https://books.google.com.br/books/about/Res%C3%ADduos_pl%C3%A1sticos_e_reciclagem.html?id=wTvJCgAAQBAJ&printsec=frontcover&source=kp_read_button&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false. Acesso em: 19 mai. 2019.